

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADA POR ASPERSÃO CONVENCIONAL
COM DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE LÂMINA
DE IRRIGAÇÃO**

Manoel Teixeira de Faria

Licenciado em Ciências Agrícolas

JABOTICABAL - SÃO PAULO- BRASIL

2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADA POR ASPERSÃO CONVENCIONAL
COM DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE LÂMINA
DE IRRIGAÇÃO**

Manoel Teixeira de Faria

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pavani

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL - SÃO PAULO- BRASIL

Agosto 2012

F224p Faria, Manoel Teixeira de
Produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigada por aspersão convencional com diferentes métodos de estimativa de lâmina de irrigação. / Manoel Teixeira de Faria. – – Jaboticabal, 2012
xiv, 84 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012
Orientador: José Eduardo Pitelli Turco
Banca examinadora: Antônio Carlos Barreto, José Renato Zanini, Renato Farias do Vale Junior, Rogério Teixeira de Faria
Bibliografia

1. Água no solo. 2 Eficiência do uso da água. 3. Evapotranspiração. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.674:635.652

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.)
IRRIGADA POR ASPERSÃO CONVENCIONAL COM DIFERENTES MÉTODOS
DE ESTIMATIVA DE LÂMINA DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: MANOEL TEIXEIRA DE FARIA

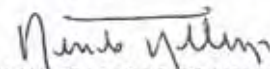
ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIZ CARLOS PAVANI

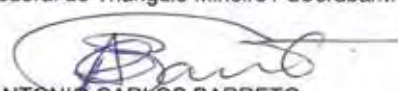
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA
(CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

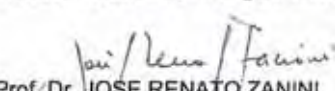
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR

Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberaba/MG


Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BARRETO

Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberaba/MG


Prof. Dr. JOSE RENATO ZANINI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 01 de agosto de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MANOEL TEIXEIRA DE FARIA – Nascido em 20 de setembro 1963, na cidade de Caiapônia – GO. Iniciou o curso de graduação em Licenciatura em Ciências Agrícolas, em agosto de 1986, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), concluindo-o em 20 de janeiro de 1990. Foi admitido como professor via concurso público na Escola Agrotécnica Federal de Urutaí (Instituto Federal Goiano – Câmpus – Urutaí – GO), onde leciona as disciplinas de meteorologia e climatologia, relação água-solo-planta e atmosfera, equipamentos de irrigação, projeto de irrigação e avaliação de projetos, e trabalha até os dias atuais. Em agosto de 2001, iniciou o curso de mestrado na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pelo programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), vindo a concluí-lo em julho de 2003. Em março de 2009, iniciou o curso de doutorado no mesmo programa.

DEDICO

À minha amada família, à minha esposa **Adriane Rosa de Faria**, ao meu filho **César Augusto Rosa de Faria**, à minha sobrinha **Aline Rosa da Costa**, por todo apoio, carinho, amor, incentivo e confiança a mim depositados, para que eu pudesse cumprir mais uma etapa de minha vida.

OFEREÇO

A meus pais **Geraldo Teixeira de Faria** e **Maria Borges da Silva** (*in memoriam*), pela educação que me foi dada e por ter sido meu exemplo de vida e luta.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por me dar saúde, força e iluminar meus caminhos;

À minha esposa **Adriane Rosa de Faria**, pelo amor, cumplicidade, apoio, compreensão e companheirismo;

Ao Prof. Dr. **José Eduardo Pitelli Turco**, pela orientação valiosa, amizade e compreensão nesses anos de convivência;

Aos professores, **Dr. Luiz Carlos Pavani**, **Dr. Rouverson Pereira da Silva**, **Dr. José Carlos Barbosa** e **Dr. Adhemar Pitelli Milani**, pela participação e sugestões apresentadas no exame geral de qualificação;

Aos professores, **Dr. Antônio Carlos Barreto**, **Dr. José Renato Zanini**, **Dr. Renato Farias do Vale Júnior** e **Dr. Rogério Teixeira de Faria**, pelas sugestões apresentadas na defesa da tese;

À doutoranda **Ana Paula Pires Maciel Guirra**, pela grande colaboração, amizade e apoio, em toda a execução desta tese;

Aos funcionários **João Carlos Trentin** e **Ailton Crispim**, pela ajuda e companheirismo durante o desenvolvimento do experimento;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial ao **José Antônio Costa**, **Luiz Cláudio da Silva**, **Marco Antônio Reche** e **Davi Aparecido Trevizolli**, pela amizade e companheirismo durante minha permanência nesta Instituição para a realização do curso de doutorado;

Aos **funcionários** da seção de Pós-Graduação, pelo atendimento e auxílio;

Ao **Instituto Federal Goiano, Câmpus Urutaí**, pela dispensa durante o tempo de execução do trabalho;

À **Capes**, pela concessão da bolsa de doutorado;

Enfim, a **todos** os que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização de meu trabalho.

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	viii
I. INTRODUÇÃO	01
II. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão.....	03
2.2 Produção de feijão no Brasil.....	04
2.3 Origem e caracterização morfológica.....	05
2.4 Clima e época de plantio.....	06
2.5 Fitossanidade.....	08
2.6 Nutrição e adubação.....	09
2.7 Manejos de irrigação.....	10
2.7.1 Método do Tanque Classe A.	10
2.7.2. Manejo por Tensiometria.....	11
2.8 Evapotranspiração.....	11
2.9 Balanço de energia.....	13
III. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Caracterização da área experimental	18
3.2 Delineamento experimental e condução da cultura na área experimental	19
3.3 Manejo da irrigação	20
3.4 Descrição dos tratamentos	24
3.4.1 Testemunha (Test.)	24
3.4.2 Tensiometria (TENS)	25
3.4.3 Tanque Classe A (TCA)	25
3.4.4 Razão de Bowen (RB)	27

3.4.5 Penman-Monteith (PM)	33
3.5.2 Avaliação do cenário possível simulado com o tratamento da estimativa da ET _c pelo método de Penman-Monteith FAO-56 correto	37
IV RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Considerando os dados como foram obtidos – cenário do experimento	39
4.2 Cenário provável, considerando o cálculo correto de ET ₀ com o método de Penman-Monteith (PM) – cenário novo	51
5 CONCLUSÕES	66
VI REFERÊNCIAS	68
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Vista do tanque Classe A, poço tranquilizador e parafuso micrométrico ..	26
Figura 2. Vista do datalogger e dos sensores instalados na área experimental para a medição das variáveis do método da razão de Bowen	29
Figura 3. Saldo radiômetro instalado na área experimental	30
Figura 4. Anemômetro instalado na área experimental	31
Figura 5. Psicrômetro de termopares instalado na área experimental	31
Figuras 6. Estação meteorológica automatizada instalada na área do departamento de Engenharia Rural da UNESP-FCAV	36
Figura 7. Curvas de evapotranspiração da cultura (ETc) no cenário do experimento: A –método do tanque classe A (ETc TCA) e de Penman-Monteith com cálculo errôneo (ETc PM*); B – método da Razão de Bowen (ETc RB) e de Penman-Monteith com cálculo errôneo (ETc PM*); C - método do tanque classe A (ETc TCA) e da Razão de Bowen (ETc RB)	41
Figura 8. Variação do potencial da água no solo (Ψ_m) nos tratamentos manejados com RB e TENS, nas profundidades de 20; 40 e 60 cm, desde o início da diferenciação dos tratamentos (I) até o florescimento (F), do florescimento até o início do aparecimento das vagens (V) e durante a fase de crescimento, enchimento e maturação das vagens (V – M)	48
Figura 9. Produtividade do feijoeiro em função do total de água recebida durante o ciclo da cultura.	51
Figura 10. Evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith com erro no cálculo original (ET ₀ PM*) e sem erro (ET ₀ PM)	52
Figura 11. Curvas obtidas com os dados diários de ETc a partir do erro de cálculo da ET ₀ (ETc PM* - cenário com os dados como foram obtidos) e do cálculo correto (ETc PM – cenário corrigido)	52
Figura 12. Evapotranspiração da cultura (ETc) estimada pelos métodos do Tanque	

Classe A (TCA) e Penman-Monteith (PM) A – cenário do experimento; B – cenário novo	53
Figura 13. Evapotranspiração de cultura (ET _c) estimada pelos métodos de Penman-Monteith(PM) e razão de Bowen (RB); A – cenário do experimento; B – cenário novo	54
Figura 14. Evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith e evapotranspiração de cultura estimada pela técnica da razão de Bowen	55
Figura 15. Curva do coeficiente de cultura {K _c (RB)} obtido pela razão entre a evapotranspiração da cultura (ET _c) obtida com o método da razão de Bowen (RB) e a evapotranspiração de referência (ET ₀) estimada com o método de Penman-Monteith (PM)	57
Figura 16. Regressão linear entre os valores totais de lâminas líquidas calculadas (h _{LC}) e os de lâminas recebidas pela cultura (h _{LR}) a partir dos 27 dias após a emergência	58
Figura 17. Produtividade de grãos em função da lâmina de água recebida	59
Figura 18. Eficiência da água aplicada em função da lâmina de água recebida pela cultura (h _{LR})	60
Figura 19. Número de vagens por planta em função da lâmina de água recebida	61
Figura 20. Número de grãos por vagem em função da lâmina de água recebida	62

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Análise química de fertilidade do solo (0-0,2 metro) da área experimental, no ano agrícola de 2010.....	18
Tabela 2. Características físico-hídricas médias e constantes da equação de GENUCHTEN para as camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 40 m de profundidade do solo da área experimental	23
Tabela 3. Caracterização climática na área experimental durante a condução do experimento	40
Tabela 4. Valores médios das percentagens dos fluxos de calor latente (LE/Rn), de calor sensível (H/Rn) e de calor no solo (G/Rn) durante os estágios de crescimento, de reprodução e de maturação em feijoeiro irrigado, obtidos com o método da razão de Bowen.	43
Tabela 5. Número de irrigações (NI) antes (até os 26 DAE) e após o início da diferenciação dos tratamentos e lâminas calculadas (hLC) e recebidas (hLR), médias e totais, conforme o tratamento de manejo de irrigação	44
Tabela 6. Número total de irrigações (NTI), lâminas líquidas calculadas (hLC) e recebidas (hLR) , totais e médias por tratamento e intervalo médio entre irrigações (IMI), durante o período de diferenciação dos tratamentos	45
Tabela 7. Diferenças absolutas e percentuais entre os tratamentos, das lâminas líquidas calculadas (hLC), em cada fase de desenvolvimento da cultura	46
Tabela 8. Resumo da análise de variância dos fatores de produção (estande final, vagens/planta, grãos/por vagem e produtividade de grãos) e eficiência da água aplicada (EAA)	49
Tabela 9. Fatores de produção da cultura do feijoeiro e eficiência da água aplicada (EAA)	49
Tabela 10. Resumo da análise de variância da regressão para efeito das lâminas	

recebidas na produtividade	59
Tabela 11. Resumo da análise de variância da regressão para efeito das lâminas recebidas na EAA	60
Tabela 12. Resumo da análise de variância da regressão para os dados do número de vagens por planta	61
Tabela 13. Resumo da análise de variância da regressão para os dados de grãos por vagem	62
Tabela 14. Número de irrigações (NI) antes (até os 26 DAE) e após o início da diferenciação dos tratamentos e lâminas calculadas (hLC), médias e totais, em cada período, considerando o novo cenário (método de Penman-Monteith corrigido –ETc PM)	64
Tabela 15. Número total de irrigações (NTI), lâminas líquidas calculadas (hLC), totais e médias por tratamento, e intervalo médio entre irrigações (IMI), durante o período de diferenciação dos tratamentos (27 aos 88 DAE), considerando o novo cenário (método de Penman-Monteith corrigido – PM)	65

**PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADA
POR ASPERSÃO CONVENCIONAL COM DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DE LÂMINA DE IRRIGAÇÃO**

RESUMO – Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o manejo de irrigação mais adequado para a máxima produtividade da cultura do feijoeiro grupo carioca, cultivar pérola. O experimento foi conduzido na Área Demonstrativa e Experimental de Irrigação (ADEI) da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP. Foram definidos cinco tratamentos: TCA - irrigação com base na ET_0 estimada pelo método do Tanque Classe A; RB - irrigações efetuadas com base na ET_C medida pelo método da Razão de Bowen; TENS – irrigações baseadas em leituras de tensiômetros instalados nas profundidades de 0,20 e 0,40 m; PM – irrigações efetuadas com base na ET_0 estimada pelo método de Penman-Monteith e Test. – testemunha. Os resultados foram submetidos à análise de variância. Para a comparação das médias, foi utilizado o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Na ausência de chuva em todo o ciclo da cultura, a máxima eficiência de uso da água aplicada em feijoeiro foi alcançada com a lâmina total de irrigação de 344,3 mm recebida pela cultura no tratamento da razão de Bowen. As variáveis de produção, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos, na cultura do feijoeiro, responderam de forma linearmente crescente ao aumento das lâminas totais de irrigação aplicadas no intervalo (146,0 mm a 405,0 mm).

PALAVRAS-CHAVE: água no solo, eficiência do uso da água, evapotranspiração.

**PRODUCTIVITY OF BEAN CROP (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGATED BY
CONVENTIONAL SPRINKLER WITH DIFFERENT METHODS FOR IRRIGATION
LEVEL ESTIMATE**

SUMMARY – The objective of this study was to analyze the most appropriate irrigation management to achieve the highest productivity for carioca beans (*phaseolus vulgaris*), perola cultivar. The research was developed in the Demonstrative and Experimental Area of Irrigation (ADEI) of FCAV/UNESP, Jaboticabal Campus, SP. Five treatments were set out: TCA – irrigation based in ETo estimated by the Class A pan method; RB – irrigation based in ETc measured by the Bowen ratio method, TENS - irrigation based on tensiometer readings installed at 0.20 m and 0.40 m of depth; PM - irrigation conducted with base in ETo estimated by the Penman-Monteith method and Test. - witness. The results were submitted to analysis of variance. To compare the averages the Tukey test was used at 5% of probability. In the absence of rain throughout the crop cycle, the maximum of water use efficiency applied on the beans was obtained by the total irrigation level of 344.3 mm received in the Bowen ratio method. The production variables, number of pods per plant, number of grains per pod and grain yield in the crop, responded linearly rising with the increased of total irrigation level applied in the range (146.0 mm to 405.0 mm).

KEYWORDS: evapotranspiration, water use efficiency, soil water.

I INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão *Phaseolus vulgaris* L., sendo os Estados do Paraná, Minas Gerais, Bahia, São Paulo e Goiás os principais produtores dessa leguminosa. A produtividade média da cultura, na safra de 2010/2011 foi de 941 kg ha⁻¹ e, nesse mesmo período, a área cultivada foi de aproximadamente 4.005.400 ha e produção de 3.767.500 t, incluindo o feijoeiro de sequeiro e irrigado, nos sistemas não consorciado e consorciado com outras culturas (CONAB, 2012).

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura de extrema importância para a sociedade brasileira, uma vez que é uma das fontes de proteína mais utilizada pela população mais carente (PAULA JÚNIOR et al., 2008). Cultivares melhoradas de feijoeiro comum com capacidade de expressão de alta produtividade, ampla adaptação, menor sensibilidade aos estresses bióticos ou abióticos e ciclo variando de 75 a 98 dias representam uma das mais significativas contribuições à eficiência do setor produtivo (SILVA & DEL PELOSO, 2006).

A disponibilidade do recurso de água é cada dia mais importante, tornando-se cada vez mais necessário o uso criterioso da irrigação, com altos níveis de uniformidade e eficiência no uso. Para atender a essas exigências, a preocupação com a qualidade da irrigação faz-se necessária, tanto no processo de planejamento e operação dos sistemas como no manejo das irrigações (FRIZZONE, 1998).

A busca de tecnologia para obter aumento da produtividade de grãos tem fomentado o interesse pela irrigação, possibilitando aos agricultores irrigantes maiores produções em locais e épocas em que a distribuição natural de chuvas não ocorre uniformemente. Nas regiões onde a insuficiência ou a má distribuição das chuvas, em alguns períodos do ano, inviabiliza a exploração agrícola econômica, a irrigação justifica-se como recurso tecnológico indispensável ao aumento da produtividade das culturas, além de contribuir para a utilização mais intensa de recursos produtivos ociosos na propriedade rural.

Para o estudo da eficiência do manejo da irrigação, deve-se priorizar o retorno econômico ao irrigante, cuja quantidade de água e época de aplicação são de grande importância para se obter a máxima produção econômica (PAZ et al., 1997).

Segundo FERNANDES & TURCO (2003), o conhecimento do consumo de água nos diversos estádios ou etapas de desenvolvimento das plantas permite irrigações mais racionais, de acordo com a exigência da cultura. Para a irrigação atingir resultados satisfatórios, deve ser bem quantificada, pois aplicação de lâminas de água insuficientes repõe água somente nas camadas superficiais do solo, não atingindo toda a zona das raízes. Por outro lado, irrigações excessivas proporcionam perda de água e nutrientes, além de favorecer o aparecimento de microrganismos patogênicos, podendo prejudicar as raízes por falta de circulação de ar em casos de solos com drenagem deficiente.

A aplicação mais notória, e talvez a pioneira da evolução digital na área agrícola, é a automação da medição de dados agrometeorológicos, que passou de um processo manual, com amostragens discretas e suscetíveis a diversos tipos de falhas, para um sistema de medida totalmente automatizado, que oferece o registro contínuo de dados com maior confiabilidade. A partir daí, os trabalhos utilizando o monitoramento automático de sensores no campo têm contribuído não somente para o aumento da produtividade, mas também para a melhoria da qualidade dos produtos agrícolas e para a preservação do meio ambiente.

Diante desse contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o manejo de irrigação mais adequado para a máxima produtividade da cultura do feijoeiro grupo carioca, cultivar pérola.

II REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão

O feijoeiro de inverno é uma cultura de grande importância socioeconômica, principalmente no Estado de São Paulo, com produtividade correspondente ao dobro das safras das águas e da seca (RAPASSI et al., 2003).

A produtividade do feijão é muito variável, mas é conhecido que as cultivares de crescimento indeterminado são mais produtivas, em relação às cultivares rasteiras. No Brasil, a produtividade média gira em torno de 12 a 18 t ha⁻¹ de vagens verdes, com o tipo “manteiga” de crescimento indeterminado (p. ex.: cultivar Teresópolis), podendo chegar a 28 t ha⁻¹ (FILGUEIRA, 2008).

As cultivares de crescimento indeterminado exigem, para maior produção, o tutoramento das hastes, que podem atingir 2,5 m de comprimento (ABREU et al., 2000). Isto contribui para onerar a produção, por se tratar de uma prática cultural que exige maior disponibilidade de mão-de-obra (FILGUEIRA, 2008).

Para as cultivares de crescimento indeterminado, o período de colheita inicia-se entre 50 e 70 dias a contar da semeadura, e as colheitas são numerosas e frequentes (até três vezes por semana), prolongando-se por cerca de 30 dias, dependendo do estado nutricional e fitossanitário das plantas. Já para as cultivares de crescimento determinado, a colheita inicia-se com 45 a 55 dias após semeadura, estendendo-se por duas a três semanas. Aos 60 - 65 dias pós-plantio, pode-se efetuar uma única colheita, com subsequente arranquio das plantas. O ponto ideal de colheita é quando as vagens atingem máximo desenvolvimento, antes de se tornarem fibrosas. Na colheita, as vagens devem estar ainda tenras, com as extremidades podendo ser vergadas e quebradas sem esforço (GUEDES 2003).

Na década de 80, cultivares de hábito de crescimento determinado foram introduzidas de outros países ou obtidas no Brasil através de programas de melhoramento genético. Por exemplo, ‘Cota’ (LEAL, 1987), ‘Alessa’ (LEAL, 1990) e

'Andra' (LEAL, 1990) são cultivares nacionais que produzem vagens de qualidade, em torno de 15 cm de comprimento, tenras e sem fibras, apresentando secção transversal achatada (tipo "manteiga") ou arredondada (tipo "macarrão"). Embora menos produtivas que as trepadoras, têm a vantagem de não necessitar de tutoramento e de ocupar a área cultivada por menos tempo, possibilitando, ainda, mecanizar tratos culturais (LEAL et al., 1983; PINTO et al., 2001), inclusive a colheita (FILGUEIRA, 2008).

O período de floração é curto, e a maturação é uniforme. LEAL et al. (1986), através de estudos comparativos entre cultivares estaqueadas e rasteiras, mostraram ser vantajosa a opção por estas últimas, pois com apenas três colheitas foi possível obter rendimentos superiores a 15 t ha⁻¹, com custos consideravelmente mais baixos. Outra vantagem do cultivo do feijão-rasteiro é a possibilidade de se efetuar uma única colheita (LEAL, 1990; PEIXOTO et al., 1993; PEIXOTO et al., 1997; PINTO et al., 2001), com o arranquio das plantas no campo e posterior separação das vagens. O rendimento de vagens é relativamente menor nessas condições, mas há compensação pela menor necessidade de mão-de-obra e encurtamento do ciclo da cultura. Ademais, o método propicia condições bem mais confortáveis quanto à colheita e embalagem das vagens (PINTO et al., 2001).

2.2 Produção de feijão no Brasil

O feijoeiro é uma cultura que assume grande importância socioeconômica, além de seu produto ser considerado o principal alimento proteico consumido no Brasil, uma vez que é alimento básico, principalmente da classe populacional de renda mais baixa, tornando-se, assim, alimento indispensável nas refeições da maioria dos brasileiros (ARF et al., 1996).

Segundo VIEIRA et al. (1989), o Brasil contribui com mais de 20% da área total de feijão plantada no mundo, e conforme PESSOA et al. (2001), o País estava entre os três maiores produtores mundiais de feijão, mas, também, é o maior consumidor, necessitando de importações. De acordo com a FAO, citado por SALVADOR (2011), a

produção brasileira, em 2009, foi de 3,5 milhões de toneladas. O Brasil é o maior produtor mundial de feijões (está incluída a produção de feijão-caupi), respondendo por 17% da produção mundial.

O feijoeiro é cultivado em quase todas as regiões do Brasil, principalmente em lavouras de pequeno e médio portes onde, de modo geral, é a cultura de maior destaque, responsável pela maior fonte de renda das propriedades. As exigências do feijoeiro quanto à disponibilidade hídrica e clima são responsáveis pela grande oscilação da oferta do produto no decorrer dos anos, assim como as baixas produtividades alcançadas, em que a média nacional se manteve estagnada em torno de 600 kg ha⁻¹ ao longo de 30 anos (IBGE, 1996). Já na safra de 2010/2011, a produtividade média da cultura foi de 941 kg ha⁻¹. Porém, a média de produtividade na safra de inverno (irrigado) teve médias de 2.464 kg ha⁻¹ na região Sudeste e de 2.662 kg ha⁻¹ na região Centro-Oeste (CONAB, 2012).

2.3 Origem e caracterização morfológica

Existem dois centros primários de origem para o gênero *Phaseolus*, sendo o primeiro, e mais importante, aquele localizado na América Central, nos altiplanos do México e da Guatemala, e o segundo, na Ásia Tropical. A espécie *Phaseolus vulgaris* L. é originária do primeiro centro, onde era cultivada pelos indígenas pré-colombianos desde o Canadá até o Chile e a Argentina, sendo que a domesticação ocorreu há mais de 7.000 anos (ATHANÁZIO, 1993).

Segundo DE OCA (1987), o feijão teve sua origem na Europa, resultando de mutações genéticas do feijão comum introduzido da América. Sua evolução e seu melhoramento ocorreram na França e nos Países Baixos, entre outros. As primeiras cultivares apropriadas para colheita de vagens verdes foram obtidas em princípios do século XIX, através de cruzamentos entre feijões cultivados na Europa e material genético procedente da América Central. Posteriormente, essas cultivares foram introduzidas na América do Norte, onde cruzamentos subsequentes foram realizados

com feijões da região, obtendo-se novas cultivares de maior potencial produtivo (CARVALHO, 1992).

O feijão é uma hortaliça de importância mundial (ABREU et al., 2000) e bastante difundida em algumas regiões brasileiras (COELHO et al., 1974). Difere do feijão produzido para consumo de grãos secos por apresentar baixo teor de fibra nas vagens e polpa mais espessa (FILGUEIRA, 2008; PINTO et al., 2001). A planta apresenta caule volúvel, folhas trifoliadas, raízes superficiais, flores brancas ou róseas, dependendo da cultivar, e vagens alongadas (FILGUEIRA, 2008).

Segundo PORTES (1988) e FILGUEIRA (2008), as cultivares de feijão podem ser divididas conforme o hábito de crescimento da planta. As indeterminadas ou volúveis possuem um meristema apical vegetativo que possibilita crescimento contínuo das plantas (ATHANÁZIO, 1993) e têm a capacidade de se enrolarem em suportes ou tutores, e atingem mais de 2,0 m de altura. As inflorescências formam-se de gemas axilares de folhas e ramos, com período de floração além de 25 dias, sendo que o ciclo de vida, para a maioria das cultivares, situa-se entre 100 e 110 dias (PORTES, 1988). As cultivares de crescimento determinado, também chamadas de arbustivas ou rasteiras ou anãs, têm seus ápices encerrados por inflorescências (ATHANÁZIO, 1993), que se originam da haste principal e dos ramos laterais. As plantas atingem cerca de 60 cm de altura e apresentam período curto de floração, em torno de 14 dias. A maturação das vagens é, em geral, uniforme. Normalmente, o ciclo dessas variedades situa-se entre 60 e 80 dias; algumas delas, porém, podem ir além dessa faixa (PORTES, 1988).

2.4 Clima e época de plantio

FILGUEIRA (2008) afirma que o feijão é uma hortaliça de ampla adaptabilidade à temperatura ambiente, desenvolvendo-se a contento dentro de uma faixa de 18 a 30° C. Sob temperatura superior a 35 °C, a produtividade diminui significativamente, pois o pólen é prejudicado, acarretando vagens deformadas (PORTES, 1988; KIGEL et al.,

1990), estudando cultivares de crescimento determinado em condições controladas de temperaturas altas (27 a 32 °C), verificaram que a produção foi drasticamente reduzida, embora tenha havido incremento na ramificação e no florescimento.

Por outro lado, o feijão-de-vagem é das hortaliças mais intolerantes ao frio e à geada (FILGUEIRA, 2008). ALDRIGHI et al. (2000) observaram estagnações no desenvolvimento do feijão em períodos de geada e sugeriram que as temperaturas médias das regiões de cultivo podem servir de base para a escolha da época de semeadura. Assim, temperaturas abaixo de 15 °C retardam o desenvolvimento das plantas. Segundo DICKSON & PETZOLDT (1987), temperaturas do ar abaixo de 10 °C, durante a fase de germinação das sementes, podem provocar lesões e redução do vigor, sendo que solo frio predispõe a apodrecimentos de pré-emergência.

Segundo KIGEL et al. (1990), o efeito da temperatura sobre ramificação, florescimento e padrão de vagem, em cultivares de crescimento determinado, não tem sido muito estudado. Sabe-se, contudo, que a produção e a distribuição de vagens ao longo do eixo da planta são muito variáveis e dependentes das condições ambientais.

De acordo com PORTES (1988), os fatores climáticos que mais influenciam a queda de flores e o vingamento de vagens em feijão, com consequentes reflexos na produtividade, são as temperaturas máximas e mínimas, estresse hídrico e baixa umidade relativa do ar. TOMAZ et al. (2001) afirmam que a temperatura é o fator climático que exerce a mais forte influência sobre o percentual de vingamento de vagens.

Em localidades de inverno ameno, é possível o plantio do feijão ao longo do ano, possibilitando a comercialização na entressafra e cotações mais elevadas, especialmente em julho/agosto. Na maioria das regiões produtoras, incluindo serras e altiplanos, a época normal de plantio é agosto/abril, evitando-se os meses de maio a julho, quando as temperaturas podem ser excessivamente baixas. Quanto ao fotoperiodismo, o feijão é reconhecidamente uma cultura indiferente, podendo produzir equivalentemente sob dias longos ou curtos (FILGUEIRA, 2008).

2.5 Fitossanidade

As cultivares de feijão com crescimento determinado têm contribuído para a expansão da cultura em diversas regiões agrícolas a um custo operacional mais baixo. Um fator de importância a ser considerado na liberação de cultivares é sua resistência a certas pragas e doenças.

A “ferrugem”, causada pelo fungo *Uromyces appendiculatus*, é considerada dentre as mais importantes para a espécie *Phaseolu vulgaris*, podendo causar perdas de até 100%, dependendo das condições ambientais e da suscetibilidade da cultivar (VIEIRA et al., 1989). Segundo DOORENBOS & KASSAN (1994), a evolução epidemiológica da “ferrugem” é favorecida por alta umidade e temperatura elevada, condições ideais para que ocorra a rápida germinação dos esporos e o estabelecimento das infecções. O cultivo do feijão geralmente é feito utilizando-se de sistemas de irrigação por aspersão, que, segundo VIEIRA-JÚNIOR et al. (1998), aumenta a razão epidemiológica da doença. Dentre as medidas de controle da “ferrugem”, a utilização de cultivares resistentes tem recebido atenção dos pesquisadores por ser um método eficiente, seguro, barato e acessível por produtores de qualquer nível econômico.

Algumas pragas podem causar danos às plantas, como é o caso da cigarrinha-verde (*Empoasca kraemeri*), um dos insetos mais importantes para a cultura do feijão, por vezes provocando perda total da produção. As folhas, quando atacadas, atrofiam-se e param de se desenvolver (SARTORATO et al., 1983), devido à ação toxicogênica de substâncias liberadas pela saliva dos insetos (GALLO et al., 1988). A praga torna-se mais prejudicial no plantio da seca, principalmente em sistema de monocultivo, sendo a fase mais crítica a da emergência até o florescimento das plantas (SARTORATO et al., 1983).

A lagarta *Tecla jebus* ataca as vagens, perfurando-as para se alimentar das sementes ainda em formação e facilitando o ingresso de organismos apodrecedores (SARTORATO et al., 1983). OLIVEIRA et al. (2001) relataram a ocorrência dessa lagarta em feijão de crescimento indeterminado no município de Itaguaí-RJ, encontrando diferenças significativas entre cultivares, com relação à sua incidência nos frutos.

2.6 Nutrição e adubação

Segundo FILGUEIRA (2008), a cultura do feijão adapta-se melhor a solos de textura média, sendo intolerante à acidez elevada e produzindo melhor na faixa de pH 5,6 a 6,8. Em solos mais ácidos, a calagem deve ser efetuada, elevando-se a saturação por bases para 70%, procurando-se atingir pH 6,5. Além do efeito corretivo, a calagem fornece cálcio, nutriente bastante exigido pela cultura. Experimentos conduzidos no Brasil evidenciaram respostas acentuadas à aplicação de fósforo e cálcio, não havendo efeito da aplicação de potássio em termos de produtividade.

Uma prática consagrada entre os produtores tem sido a semeadura de feijão em rotação com outras culturas tutoradas e pesadamente adubadas, como tomateiro e pepineiro (FILGUEIRA, 2008), bastando apenas uma adubação suplementar de cobertura, à base de nitrogênio (TAVARES SOBRINHO et al., 2000). Nos sistemas rotacionados, quando as culturas precedentes são adubadas, os efeitos residuais dos fertilizantes fosfatados se fazem-se notar de forma expressiva (SILVA et al., 2003). Estes últimos autores, ao estudarem o efeito residual da adubação efetuada com o pré-cultivo de batatinha, conseguiram produtividade de 12,2 t ha⁻¹ da cultivar Macarrão Rasteiro 274, sem nenhuma adubação adicional.

O emprego de adubos orgânicos na cultura do feijão é pouco mencionado, via resultados experimentais, referindo-se mais à adubação química, com recomendações de aplicação de fósforo, potássio e nitrogênio, baseadas em análises de solo (ARAÚJO et al., 2000).

Tem-se atribuído aos vegetais produzidos com fertilizantes orgânicos maior valor nutricional, traduzido em teores mais altos de vitaminas, proteínas, açúcares e matéria seca, com quantidades equilibradas de minerais (SANTOS, 1993). Contudo, há ainda poucas informações sobre seus efeitos na qualidade de espécies de hortaliças (SANTOS et al., 2000).

SANTOS et al. (2000), aplicando 13 t ha⁻¹ de esterco de galinha e 23 t ha⁻¹ de esterco bovino, obtiveram produtividade superior à média nacional, que está em torno de 25 t ha⁻¹, com a cultivar Macarrão *Trepador Hortivale*. SANTOS et al. (2000)

acreditam que os efeitos dos esterco de galinha e bovino sobre a produtividade de vagens devam-se não somente ao suprimento de nutrientes, mas também à melhoria das condições físicas do solo, proporcionando maior acúmulo de água e melhor aproveitamento dos elementos já presentes. OMORI & SUGIMOTO (1978) demonstraram que a incorporação de esterco ao solo aumentava a taxa de absorção de nutrientes em várias hortaliças.

A aplicação balanceada de esterco é fundamental para a saúde das plantas. Nutrientes em quantidade excessiva ou deficiente podem tornar uma lavoura mais suscetível ao ataque de pragas (CHABOUSSOU, 1987; REIJNIES, 1999).

2.7 Manejos de irrigação

2.7.1 Método do Tanque Classe A

O tanque de evaporação classe “A” é cilíndrico, com diâmetro de 121 cm e 25,5 cm de profundidade, construído de material galvanizado (calibre 22) e montado sobre uma plataforma de madeira aberta, de 15 cm de altura. Deve-se completá-lo com água até 5 cm da borda, e o nível da água não deve baixar além de 7,5 cm desta. A água deve ser renovada regularmente para eliminar as impurezas. Normalmente, é dotado de parafuso micrométrico, com capacidade para medir variações de 0,02 mm, localizado em poço tranquilizador. O local para instalação deve ser preferencialmente gramado (20 m x 20 m), com abertura nas laterais da plataforma para permitir a livre circulação do ar (PEREIRA et al., 1997).

Dentre os vários métodos existentes para o manejo da irrigação, o do tanque Classe A tem sido amplamente utilizado em todo o mundo, devido, principalmente, ao seu custo relativamente baixo, à possibilidade de instalação próximo da cultura a ser irrigada e à sua facilidade de operação, aliado aos resultados satisfatórios para a estimativa hídrica das culturas.

A ETo estimada com dados do tanque Classe A (TCA), que é um método indireto e bastante utilizado no Brasil devido sua facilidade no uso e baixo custo, necessita da evaporação da água do tanque Classe A (ECA) e do coeficiente do tanque (K_t), que varia de acordo com as condições climáticas e locais. As equações que determinam o valor do K_t , na maioria das vezes, são baseadas na umidade relativa média do ar (UR_m), na velocidade do vento (U_2), no comprimento da bordadura e no tipo de superfície em que o tanque está colocado (grama ou solo nu).

2.7.2 Manejo por Tensiometria

O tensiômetro, aparelho desenvolvido por Gardner, em 1922 (CAMARGO et al., 1982), é empregado para medir a tensão com que a água é retida pelas partículas do solo, também conhecido por potencial matricial. Segundo CAMPBELL & MULLA (1990), de todos os métodos disponíveis para o conhecimento dos potenciais de água no solo em irrigação, o tensiômetro é talvez o mais utilizado.

O tensiômetro a vacuômetro tem seu emprego mais recomendado para os trabalhos de controle da irrigação no campo, em virtude de sua simplicidade e facilidade de operação, comparado com o tensiômetro provido de manômetro de mercúrio. Este tensiômetro tem maior precisão nas leituras, mas, por ser de manuseio mais difícil, é mais utilizado em trabalhos de pesquisa.

2.8 Evapotranspiração

Segundo CAMARGO & CAMARGO (2000), nos anos 40 do século passado, C. W. Thornthwaite utilizou o termo evapotranspiração potencial (ETp) para expressar a ocorrência simultânea dos processos de transpiração e evaporação de um extenso gramado (superfície-padrão de posto meteorológico), sem restrição hídrica, e em crescimento ativo. PENMAN (1956) também adotou essa definição de ETp.

Em 1975, o boletim 24 da FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1977) utilizou o conceito de ETp tomando-a como referência para estimar as necessidades hídricas das culturas, explicando que a grama deve ter entre 0,08 e 0,15 m de altura para melhor caracterizar a superfície foliar transpirante. A adoção desse boletim pela comunidade irrigante consagrou o termo evapotranspiração de referência (ET_o) introduzido por JENSEN et al. (1971).

Recentemente, ALLEN et al. (2006) redefiniram ET_o como sendo aquela de um gramado hipotético, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m⁻¹. Um gramado nessas condições possui índice de área foliar (IAF) ao redor de 3 m² de área foliar por m² de terreno ocupado e assemelha-se a uma superfície verde sombreando totalmente o solo, bem suprida de umidade e em crescimento ativo.

No Brasil, predomina o uso da grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), conhecida como grama-forquilha ou "Bahia grass", sendo também adotada como vegetação-padrão nos postos agrometeorológicos.

A evapotranspiração é um processo de perda de água para a atmosfera por meio da evaporação do solo e a transpiração das plantas simultaneamente, sendo um elemento climatológico fundamental que corresponde ao processo oposto à chuva. Para SILVA & FOLEGATTI (2001), a determinação do consumo hídrico, por meio da estimativa da evapotranspiração, é de fundamental importância para o correto manejo da irrigação.

Para melhor manejo da irrigação, necessita-se da determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c), pois, a partir desta, pode-se otimizar o uso da água. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi criada para facilitar a obtenção dos valores de ET_c, pois para sua determinação direta faz-se necessário grande número de parâmetros de solo, de planta, de clima ou mesmo de equipamentos sofisticados, o que limita sua aplicabilidade (MENDONÇA et al., 2006). A ET_o, quando multiplicada por um fator que é o coeficiente de cultura (K_c), resulta este fator um indicativo do consumo ideal de água, ao longo do ciclo da planta, resulta no valor de ET_c.

2.9 Balanço de energia

Atualmente, ocorre tendência à utilização de estações meteorológicas automatizadas que auxiliam na determinação da ETo, diminuindo erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura. A alta densidade de estações meteorológicas automatizadas tem proporcionado acurácia e rapidez na coleta de dados, facilitando seu uso nas estimativas da ETo, principalmente pelo método de Penman-Monteith (BAUSCH, 1990).

A estimativa da evapotranspiração de referência está diretamente relacionada à qualidade dos dados climatológicos em que se baseia. O uso de estações meteorológicas automáticas fornece sistema completo de informações meteorológicas de modo prático e funcional, mas além da observação permanente do funcionamento dos aparelhos eletrônicos, é necessária análise para avaliar a integridade dos dados, sua qualidade e sua confiabilidade antes de serem utilizados nas equações de estimativa da ETo.

Dentre os modelos indiretos, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso do método de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura fictícia de referência como método-padrão para a estimativa de ETo. ALLEN et al. (2006) definem a ETo como a evapotranspiração que ocorre em uma cultura hipotética, a qual possui uma altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor igual a 70 s m^{-1} . Desta forma, esse conceito assemelha-se à evapotranspiração de um extenso gramado verde, de altura uniforme, em crescimento e desenvolvimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e com teor de água equivalente à capacidade de campo. A partir dos valores de ETo e com a utilização de certos coeficientes de cultura (K_c), estima-se a evapotranspiração potencial de uma cultura (ETpc) e, com mais alguns parâmetros, determina-se a lâmina de irrigação

Em condições atmosféricas normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado pela radiação solar de ondas curtas, parte da qual é refletida, conforme as características da superfície, estabelecendo um balanço de ondas curtas.

Por outro lado, a superfície também emite e recebe radiação de ondas longas da atmosfera, em função de sua temperatura, estabelecendo o balanço de ondas longas. Portanto, contabilizando-se a energia radiante de todos os comprimentos de ondas que chegam e que saem da superfície, estabelece-se o denominado saldo de radiação (R_n) (PEREIRA et al., 1997).

A essência do conceito de balanço de energia está na afirmação de que a diferença entre a energia que entra e a energia que sai de um sistema é a energia captada ou utilizada por ele. Nos sistemas vegetados, essa energia captada pode ser utilizada no aquecimento do ar e das plantas (H , calor sensível), no aquecimento do solo (G), na evapotranspiração (LE , calor latente) e nos processos de sínteses biológicas (F) (PEREIRA et al., 2002).

A obtenção da evaporação ou evapotranspiração através da partição do balanço de energia é uma alternativa que tem sido considerada promissora. Desde que possam ser medidos ou estimados com suficiente precisão os termos do balanço energético, a evapotranspiração pode ser determinada com boa precisão. Além do que, este é um método que possibilita a estimativa de evaporação ou evapotranspiração para períodos curtos, como um dia, por exemplo (PEREIRA et al., 1997).

Os primeiros estudos do balanço de energia foram feitos por Bowen (1926) sobre uma superfície líquida natural, determinando a razão entre os fluxos de calor latente e sensível, em função dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor, denominada “razão de Bowen”. Esse método tem sido utilizado para a determinação da evapotranspiração nas mais diversas culturas, haja vista sua fundamental importância para um manejo racional da água (CUNHA, 2001; RIGHI, 2004; SILVA et al., 2003; SILVA, 2005; VIANA et al., 2000).

A exatidão dos resultados, obtidos através dos cálculos de fluxos de calor latente e sensível, depende de sua obtenção, havendo a necessidade de se eliminar os erros associados a este método (PEREZ et al., 1999), como medidas de gradiente menor que a resolução dos sensores. Outro erro que pode ocorrer, são os valores próximos de -1 .

PEREZ et al. (1999) estudaram o descarte de valores inconsistentes da razão de Bowen, com o SARB (Sistema Automático da Razão de Bowen), visando ao

aprimoramento do referido método. Os autores relataram que os dados inconsistentes apareceram, principalmente ao nascer e pôr do sol, com R_n negativo, e à noite devido à inversão térmica. Outra fonte de ocorrência de erros foi o registro de $LE > 0$ (condensação), em períodos com $R_n - G > 0$. Afirmaram que isso ocorreu, normalmente, nos momentos com baixos fluxos de calor latente (0 a $0,432 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, geralmente no início da manhã ou no final da tarde) e sob baixa advecção. Ainda segundo esses autores, outro problema foi o baixo gradiente de vapor d'água (menores que $0,03 \text{ kPa m}^{-1}$) originários de fraca advecção, chuvas ou irrigação. Nessas condições, ocorreram $LE > 0$ e valores da razão de Bowen próximos a $-1,0$. Os autores concluíram, ainda, que devem ser rejeitados os dados noturnos e obtidos após precipitação ou irrigação, e que a ocorrência de gradientes de vapor d'água muito pequenos afeta a consistência das estimativas do SARB (Sistema Automático da Razão de Bowen).

HEILMAN & BRITTIN (1989) citam que, na utilização do método do balanço de energia pela razão de Bowen, para se obter valores representativos do local analisado, os coeficientes de transferência turbulenta de calor e vapor devem ser idênticos, caso válido em condições neutras, e ao contrário nas condições de estabilidade.

Para minimizar este efeito, deve-se ter extensa superfície homogênea de contorno (bordadura) para que a distância em relação à direção predominante do vento esteja na ordem de $1:100$, comparada a maior altura de medida pelos sensores.

Como há grande diferença nos processos de transferência de energia entre o dia e a noite devido à disponibilidade de energia e estabilidade atmosférica, alguns autores consideram apenas reais intervalos de medidas calculadas sobre o período do dia, excluindo também dados falhos correspondentes a dias chuvosos ou devido a outros problemas de medida (PEREZ et al., 1999; SILVA et al., 2003; SILVA, 2005).

Para HOWELL et al. (1991), o método da razão de Bowen produz bons resultados na estimativa da evapotranspiração em escalas menores, como um dia, não sendo recomendado para períodos muito grandes. Para HEILMAN & BRITTIN (1989), em condições de advecção, o método do balanço de energia pode superestimar em até 20% as medidas lisimétricas. Ressaltaram, ainda, que comumente próximo ao nascer e

pôr do sol ocorrem valores elevados da razão de Bowen devido à dificuldade de se obter gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água.

CUNHA et al. (1996) construíram psicrômetros constituídos de pares termo-elétricos de cobre-constantan, sendo um seco (exposto ao ambiente) e outro úmido (envolto por algodão umedecido) e utilizaram-nos no estudo do balanço de energia e da razão de Bowen na cultura de milho a céu aberto e chegaram às seguintes conclusões: a demanda da energia para o fluxo de calor latente superou a demanda para o fluxo de calor sensível na atmosfera, aumentando a diferença entre ambos com o desenvolvimento da cultura; o saldo de radiação foi utilizado, em proporções médias, para o ciclo de desenvolvimento, em 80% na forma de fluxo de calor latente de evaporação, 14% na forma de fluxo de calor sensível na atmosfera e 6% na forma de fluxo de calor no solo; a transferência de calor no solo acompanhou a disponibilidade energética na superfície, representada pelo saldo de radiação.

OLIVEIRA et al. (1997), também utilizando instrumental semelhante ao construído por CUNHA et al. (1996), analisaram os componentes do balanço de energia sobre o cultivo de amendoim irrigado a céu aberto e concluíram que 93,2% da radiação disponível sobre a cultura foi utilizada pelo fluxo de calor latente e 1,1% para aquecimento do solo. O fluxo de calor sensível no ar contribuiu, para o fluxo de calor latente, com 5,7%, originário da advecção.

Já FONTANA et al. (1991) observaram, em cultivo de soja, que o fluxo de calor latente consumiu maior porção da radiação líquida (95 %), quando cultivado em área irrigada, sendo este percentual reduzido para 78% na parcela não irrigada.

HOWELL et al. (1991), em estudo de balanço de energia na cultura de pepineiro em ambiente natural e protegido, observaram que a maior parte da energia disponível foi utilizada no fluxo de calor latente de evaporação e que o método do balanço de energia apresentou valores mais consistentes quando obtidos em condições internas e em ciclo de outono-inverno.

VIANA (2000), avaliando a evapotranspiração da cultura de alface em ambiente protegido, concluiu que o método da razão de Bowen não apresentou bom desempenho na estimativa diária da evapotranspiração, em comparação com os

valores medidos através de um lisímetro de pesagem. A redução da velocidade do vento e a contenção dos movimentos convectivos pela cobertura plástica diminuem a renovação das camadas de ar. Isso ocasiona baixos valores de gradiente de pressão parcial de vapor, o que dificulta a estimativa da evapotranspiração por este método.

III MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Área Demonstrativa e Experimental de Irrigação (ADEI), da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP, cujas coordenadas geográficas são: latitude 21°14'48" S, longitude 48°16'44" W e altitude média de 557 m. De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima tipo Aw (tropical chuvoso com inverno seco) (CEPAGRI, 2012 ROLIM et al., 2007). O regime de chuvas é bem definido, com uma estação chuvosa de outubro a março e uma estação seca de abril a setembro, com pluviosidade anual média de 1.425 mm. As temperaturas de máxima, mínima e média do ar são de aproximadamente 28,9; 16,8 e 22,2 °C, a umidade relativa do ar com 70,8%, insolação com o total de 2.585,8 h e total de 117,5 dias com chuva. Os dados foram obtidos da estação climatológica da FCAV-UNESP, Câmpus Jaboticabal-SP, referentes ao período de 1971 a 2000.

O solo do local é um Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 1999), e a declividade média da área experimental é de 8% com relevo suave ondulado.

Os resultados da análise química do solo, nas profundidades de 0 – 0,20 m de profundidade, realizada anteriormente à implantação do experimento, encontram-se na Tabela 1. Como a área é relativamente pequena e com as mesmas características de solo, declividade e relevo, foi retirada apenas uma amostra composta a partir de 20 amostras simples.

Tabela 1. Análise química de fertilidade do solo (0-0,2 metro) da área experimental, no ano agrícola de 2010.

Prof. (m)	pH (CaCl ₂)	M. O. g (dm ⁻³)	P resina (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	SB	T	V (%)
0 – 0,20	5,8	23	54	3,2	49	22	20	74,2	94,2	79

3.2 Delineamento experimental e condução da cultura na área experimental

Utilizou-se o delineamento experimental em parcelas inteiramente casualizadas, composto por 5 tratamentos e 4 repetições.

Os tratamentos compostos pelos métodos de estimativa do consumo de água pela cultura foram assim definidos: Testemunha (Test.) – irrigado somente para garantir a germinação e o estabelecimento da cultura; TENS – irrigado em função do consumo de água do solo, avaliado por meio da conversão do potencial mátrico do solo medido por tensiometria para umidade volumétrica do solo, utilizando-se da curva característica de retenção de água para o solo da área; TCA – irrigado em função da estimativa diária da evapotranspiração da cultura (ETc), obtida conforme metodologia apresentada por DOORENBOS & PRUITT (1976), utilizando-se de coeficientes de cultura (Kc) para o feijoeiro propostos por DOORENBOS & KASSAN (1979); RB – irrigado segundo a obtenção da ETc diária por meio do método da razão de Bowen; PM – irrigado em função da estimativa da ETc diária obtida com a utilização dos mesmos Kc para o feijoeiro utilizados para o TCA, e a estimativa diária da ETo, utilizando-se do método de Penman-Monteith, conforme apresentação proposta por ALLEN et al. (2006).

A área total experimental tinha 22.910 m², dividida em 20 parcelas de 216 m² cada e área útil por parcela de 67,2 m² (10 linhas de planta e 15 metros cada linha). Devido ao alcance médio do raio dos aspersores de 16 m, houve a necessidade de cultivar uma área maior do que o necessário para as parcelas, para garantir as bordaduras com tamanho suficiente para que não houvesse interferência da irrigação de uma parcela nas demais.

A semeadura foi realizada mecanicamente em 18 de maio de 2010 (outono), utilizando-se de sementes da cultivar de feijão Pérola do grupo “Carioca”, no espaçamento de 0,45 m entre linhas, com 12 sementes por metro, esperando obter uma população final de 200 mil plantas por hectare. A emergência das plântulas ocorreu 10 dias após a semeadura.

Baseada na análise do solo e na recomendação proposta por DOURADO NETO & FANCELLI (2000), realizou-se adubação de semeadura com 300 kg ha⁻¹ da

formulação 2-20-20 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) distribuídos no sulco. Foram realizadas duas adubações de cobertura, na razão de 100 kg ha^{-1} de N, utilizando ureia como fonte de N. A primeira foi realizada 26 dias após a emergência das plantas, e a segunda adubação efetuada 11 dias após a primeira aplicação.

Para o controle de plantas daninhas, foi aplicado herbicida de pré-emergência (trifluralina) na dose de $2,4 \text{ L ha}^{-1}$.

As parcelas de cada tratamento foram irrigadas utilizando um sistema de irrigação por aspersão convencional com aspersores dispostos em $12 \times 18 \text{ m}$, com raio de alcance de 16 m e operado com pressão de serviço de $294,0 \text{ kPa}$, proporcionando uma vazão de $5,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e com intensidade de aplicação de $23,1 \text{ mm h}^{-1}$. As irrigações foram aplicadas de acordo com cada tratamento.

Antes da implantação do experimento, foi realizado na área um teste de uniformidade do sistema de irrigação, disposto no mesmo espaçamento e funcionando com a mesma pressão nos aspersores. Nesse teste, foram determinados a taxa média de aplicação, o coeficiente de uniformidade de Cristhiansen (CUC) e o de Distribuição (CUD), seguindo a metodologia descrita em MANTOVANI et al. (2009). A taxa média de aplicação obtida foi de $23,1 \text{ mm h}^{-1}$, o CUC foi de $81,7\%$ e o CUD de $74,4\%$. Os valores encontrados para esses coeficientes de uniformidade foram um pouco inferiores aos considerados bons. Segundo FRIZZONE & DOURADO NETO (2003), os valores mínimos para o CUC e o CUD na irrigação por aspersão convencional são, respectivamente, 85 e 80% . Da semeadura (18 de maio de 2010) até a colheita de grãos (05 de setembro de 2010) foram 111 dias de cultivo.

3.3 Manejo da irrigação

As irrigações foram realizadas com um sistema de aspersão convencional, sempre que a soma da evapotranspiração determinada por cada manejo atingia aproximadamente $14,2 \text{ mm}$ de forma a repor a água no solo para atingir a umidade de capacidade de campo. Para averiguação da lâmina aplicada, foram realizadas as

leituras da água armazenada nos coletores distribuídos em uma das parcelas de cada tratamento.

Com a finalidade de determinar a lâmina líquida de irrigação (hL) a ser aplicada em cada irrigação, considerou-se que o ponto crítico de depleção de água no solo, na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, seria 50% da capacidade de água disponível no solo (CAD), nessa camada. Esse percentual é considerado o fator de disponibilidade de água no solo (f), o qual é um parâmetro que limita a parte da água disponível do solo que a planta pode utilizar, sem causar maiores prejuízos à produtividade. É, portanto, um fator de segurança que define a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (MANTOVANI et al., 2009). Segundo os mesmos autores, os valores de (f) recomendados para grãos são de 0,4 a 0,6. Para o feijoeiro, adotou-se o valor de 0,5.

Foram determinadas a CAD (mm) e a hL (mm), aplicando-se as seguintes expressões:

$$CAD = (\bar{\theta}_{cc} - \bar{\theta}_{pmp}) Z \quad (1)$$

$$hL = 0,5 CAD \text{ ou } (\bar{\theta}_{cc} - \bar{\theta}_c) Z \quad (2)$$

Em que,

CAD – capacidade de água disponível no solo ou lâmina de água armazenada no solo, na camada Z, entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente, mm;

hL – lâmina líquida de irrigação equivalente à água armazenada no solo, na camada Z, até 50% da CAD, mm;

$\bar{\theta}_{cc}$ - umidade média do solo à capacidade de campo, na camada Z (para um potencial mátrico de – 10 kPa), $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

$\bar{\theta}_{pmp}$ - umidade média do solo no ponto de murchamento permanente, na camada Z (para um potencial mátrico de – 15.000 cm c.a.; $\approx -1.500 \text{ kPa}$), $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

$\bar{\theta}_c$ – umidade crítica média correspondente ao conteúdo de água no solo a 50% da CAD, na camada Z, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

Z - profundidade da camada de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura considerada, 400 mm.

Para a quantificação desses pontos, considerou-se a profundidade efetiva do sistema radicular do feijoeiro de 0,40 m (PIRES et al., 2001). Para a obtenção da curva característica de retenção de água no solo para as camadas de 0,0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m de profundidade, foi determinada a tensão da água no solo por intermédio do extrator de Richards até -100 kPa, verificado em experimento anterior (FERNANDES, E. J., 2010). As umidades de capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) foram determinados em função da curva de retenção, aplicando-se o modelo de VAN GENUCHTEN (1980), descrito por DOURADO NETO et al. (1995), conforme a equação (3):

$$\theta_a = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha |\psi_m|)^n\right]^m} \quad (3)$$

Em que,

θ_a – umidade atual do solo para um determinado valor de potencial mátrico, na camada de solo específica Z, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r – umidade residual do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s – umidade do solo na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

α , n, m – constantes de ajuste do modelo;

$|\psi|$ – módulo do valor do potencial mátrico do solo, cm c. a.

Na Tabela 2, estão apresentados os valores das principais características físico-hídricas do solo da área, nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, assim como os parâmetros de ajuste do modelo de VAN GENUCHTEN (1980).

Tabela 2. Características físico-hídricas médias e constantes da equação de GENUCHTEN para as camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 40 m de profundidade do solo da área experimental.

Prof. (m)	θ_{cc}	θ_c	θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s	θ_r	ds (g cm^{-3})
0 – 0,20	0,3799	0,3385	0,2970	0,5390	0,297	1,13
0,20 – 0,40	0,2685	0,2388	0,2090	0,506	0,209	1,04
	Areia	Silte	Argila	α	n	m
	(%)			cm^{-1}		
0,00 – 0,20	18,18	23,07	58,75	0,0178	12,7127	0,1383
0,20 – 0,40	15,66	22,09	62,25	0,0182	17,7713	0,1432

θ_{cc} – umidade do solo à capacidade de campo; θ_c – umidade crítica do solo para 50% da CAD; θ_{pmp} – umidade do solo no ponto de murchamento permanente; ds – densidade do solo; θ_s – umidade do solo saturado; θ_r – umidade residual do solo; α , n e m são as constantes empíricas.

A determinação da CAD com os valores da Tabela 2 resultam para 50% da CAD (hL) uma lâmina líquida crítica de 14,2 m.

Até os 26 dias após a emergência, fase que foi considerada como de estabelecimento da cultura, as plantas de todos os tratamentos foram igualmente irrigadas, inclusive as da testemunha, com lâminas que foram predeterminadas com objetivo de manter a camada superficial úmida, para garantir a germinação e a emergência das plantas. A partir daí, os tratamentos foram diferenciados.

Para início da diferenciação dos tratamentos aos 26 dias após a emergência, considerando-se o valor total da CAD de 28,4 mm para a camada de 0,40 m de profundidade, aplicou-se, em toda a área, uma lâmina de uniformização de 30 mm. Essa lâmina garantiu que todos os tratamentos iniciariam a diferenciação a partir do solo na capacidade de campo.

Para os tratamentos de estimativa da evapotranspiração diária da cultura (ETc), – TCA, RB e PM, como não houve chuva durante todo o ciclo da cultura, e o lençol freático na área encontra-se a mais de 2 m de profundidade, não foram considerados os componentes drenagem profunda e ascensão capilar, de forma que o momento de irrigar para cada tratamento se deu toda vez que, a partir da irrigação anterior, a lâmina líquida calculada (hLC) atingia valor próximo ao da hL crítica (equação 2). Assim, $hLC = \sum ETc \approx hL$, sendo ETc a evapotranspiração diária da cultura estimada a partir de cada

um desses métodos. Para o método da tensiometria, a $hLC \approx hL$ foi calculada utilizando-se da expressão:

$$hLC = (\bar{\theta}_{cc} - \bar{\theta}_a) Z \approx hL \quad (4)$$

Em que,

$\bar{\theta}_a$ – umidade atual média do solo na camada Z, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Esse parâmetro foi calculado pela média entre a θ_a a 0,2 m, obtida da aplicação à equação (3) do valor do potencial matricial do solo (Ψ), medido por um tensiômetro instalado a 0,2 m de profundidade, e a θ_a a 0,4 m, obtida da aplicação à mesma equação (3) do valor de Ψ , medido por um tensiômetro instalado a 0,4 m de profundidade.

Para a determinação da lâmina líquida real média de água (hLR) que a cultura estava recebendo no limite superior do dossel, em cada irrigação, foram instalados 8 pluviômetros com diâmetro interno da área de captação de 8,6 cm em uma parcela de cada tratamento, a 1 m de altura. Terminada a aplicação da lâmina líquida calculada (hLC) nas parcelas de cada tratamentos, o volume de água coletado em cada um dos pluviômetros era transformado em lâmina, pela relação volume/área de captação, e o valor médio entre essas lâminas era considerada a hLR.

3.4 Descrição dos tratamentos

3.4.1 Testemunha (Test.)

O tratamento-testemunha (Test.) teve por objetivo servir de referência para a comparação com os tratamentos irrigados e para que se tivesse um valor pequeno de lâmina de irrigação que resultasse em alguma produção de grãos. Para isso, as plantas desse tratamento foram irrigadas apenas para garantir a germinação e o estabelecimento da cultura no campo até os 26 dias após a emergência e por ocasião da segunda adubação de cobertura para facilitar a penetração do adubo no solo.

3.4.2 Tensiometria (TENS)

Para a aplicação desse método, foram instaladas em uma das parcelas desse tratamento duas baterias de tensiômetros de cápsula de cerâmica microporosa com manômetro de coluna de mercúrio, uma com o centro da cápsula a 0,20 m e outra a 0,40 m de profundidade, na parte central da área útil das parcelas.

As medições das alturas de coluna de mercúrio no manômetro eram feitas sempre pela manhã, até às 9 h, e o potencial matricial em cada profundidade foi determinado aplicando-se a expressão:

$$\Psi = -12,6 h + h_1 + h_2 \quad (5)$$

Em que,

ψ – potencial matricial da água no solo (cm c.a.);

h – altura da coluna de mercúrio (cm);

h_1 – altura da superfície de mercúrio em relação à superfície do solo (cm);

h_2 – profundidade de instalação do tensiômetro (cm).

Os valores medidos diariamente foram convertidos para umidade atual do solo (θ_a), utilizando a expressão (3).

A aplicação de irrigação foi feita depois dos 26 DAE, sempre que a umidade atual média do solo ($\bar{\theta}_a$) atingisse valor próximo ao da umidade crítica média ($\bar{\theta}_c$ Tabela 2), ou seja, sempre que $hLC = (\bar{\theta}_{cc} - \bar{\theta}_a) 400$ fosse aproximadamente a $hL = 14,2$ mm.

3.4.3 Tanque Classe A (TCA)

Para a estimativa da lâmina de irrigação baseada na evaporação do tanque Classe A, foram utilizados dados do posto meteorológico da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FCAV, Câmpus de Jaboticabal.



Figura 1. Vista do tanque Classe A, poço tranquilizador e parafuso micrométrico.

Medidas da evaporação foram utilizadas para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) e da evapotranspiração da cultura (ET_c), com as seguintes equações:

$$ET_0 = ECA K_t \quad (6)$$

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (7)$$

Em que,

ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1});

ET_0 – Evapotranspiração de referência determinada com base na evaporação do tanque classe A (mm d^{-1});

ECA – Evaporação medida no tanque Classe A (mm d^{-1});

K_t – Coeficiente de tanque Classe A obtido em tabela (PEREIRA et al., 1997), em função da natureza e do tamanho da bordadura ao redor do tanque (grama e 10 m), da umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento a 2 m acima da superfície gramada; anexo 1;

K_c – coeficientes de cultura recomendados por DOORENBOS & KASSAN (1979), cuja análise de regressão ao longo do ciclo de cultivo produziu uma equação exponencial

(equação 8), a qual foi utilizada no cálculo de K_c usado na evapotranspiração da cultura obtida pelos métodos do tanque classe A e de Penman-Monteith.

$$k_c = 0,1641597 \exp(6,709519 \cdot 10^{-2} \cdot \text{DAE} - 4,374628 \cdot 10^{-4} \cdot \text{DAE}^2 - 2,157657 \cdot 10^{-6} \cdot \text{DAE}^3) \quad (8)$$

Em que,

$\exp [..]$ 2,7183 – (base do logaritmo natural) elevado à potência [..];

DAE – dias após a emergência.

A hLC aplicada em cada irrigação foi obtida pelo somatório da ET_c no intervalo entre irrigações, aplicando-se a expressão:

$$hLC = \sum ET_c = \sum ECA K_t K_c \approx 14,2 \text{ mm} \quad (9)$$

3.4.4 Razão de Bowen (RB)

Este método aplica a metodologia do balanço de energia sobre a cultura, estimando diretamente a ET_c .

O saldo de radiação (R_n) diário representa a energia disponível no sistema para os processos de evaporação (LE , calor latente), aquecimento do ar e das plantas (H , calor sensível) e no aquecimento do solo (G , fluxo de calor no solo), sendo representado pela equação:

$$R_n = G + H + LE + F \quad (10)$$

Em que,

R_n – saldo de radiação ou radiação líquida, $W \text{ m}^{-2}$;

G – fluxo de calor no solo, $W \text{ m}^{-2}$;

H – fluxo de calor sensível, $W \text{ m}^{-2}$;

LE – fluxo de calor latente, $W \text{ m}^{-2}$;

F – fluxo de calor para processo fotossintético $W \text{ m}^{-2}$.

Como o processo fotossintético (F) utiliza, em média, menos que 3% da R_n , pode ser quantitativamente desprezado (PEREIRA et al., 1997).

O R_n e o G foram medidos, enquanto o H e o LE foram estimados, utilizando-se a razão de Bowen.

BOWEN (1926) relacionou os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), conforme equação abaixo, sendo a mesma conhecida como razão de Bowen (β) e amplamente utilizada na estimativa da evapotranspiração.

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (11)$$

Em que,

β - razão de Bowen;

ΔT - gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) obtido com o conjunto psicrométrico instalado em dois níveis considerados (0,2 e 1,5 m de altura acima do dossel da cultura);

Δe_a - gradiente de pressão de vapor d'água (kPa) obtido com o conjunto psicrométrico instalado nos dois níveis considerados (0,2 e 1,5 m);

γ - constante psicrométrica igual a $0,0008 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ para psicrômetros não ventilados (em abrigo meteorológico com ventilação natural).

Após a estimativa a cada 15 minutos da razão de Bowen, e de posse dos valores do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor no solo (G), foi possível realizar a estimativa do fluxo de calor latente (LE), em Wm^{-2} , por meio da seguinte equação:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (12)$$

Em seguida, foi possível realizar a estimativa do fluxo de calor sensível (H), em Wm^{-2} .

$$H = \beta LE \quad (13)$$

Consideraram-se como positivos os fluxos de LE , H e G que fluíam da atmosfera ou do solo para a superfície vegetada, e negativo quando da superfície vegetada para a atmosfera ou para o solo:

$LE (+)$ - condensação;

$LE (-)$ - fluxo de vapor (evapotranspiração);

H (+) - fluxo de calor sensível para o sistema, contribuindo para o aumento da taxa de evapotranspiração;

H (-) - fluxo de calor sensível para a atmosfera;

G (+) - fluxo de calor do interior do solo para a superfície;

G (-) - fluxo de calor da superfície para o interior do solo.

Para a obtenção das variáveis da equação (12), foi instalado um sistema de aquisição de dados na área do experimento, em que os sensores foram fixados em um mastro dotado de suportes, que possibilitavam o deslocamento vertical do conjunto, acima da cobertura vegetal, em função do desenvolvimento da cultura (Figura 2).

Todos os sensores foram conectados, por meio de cabos, a um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo CR 10X.

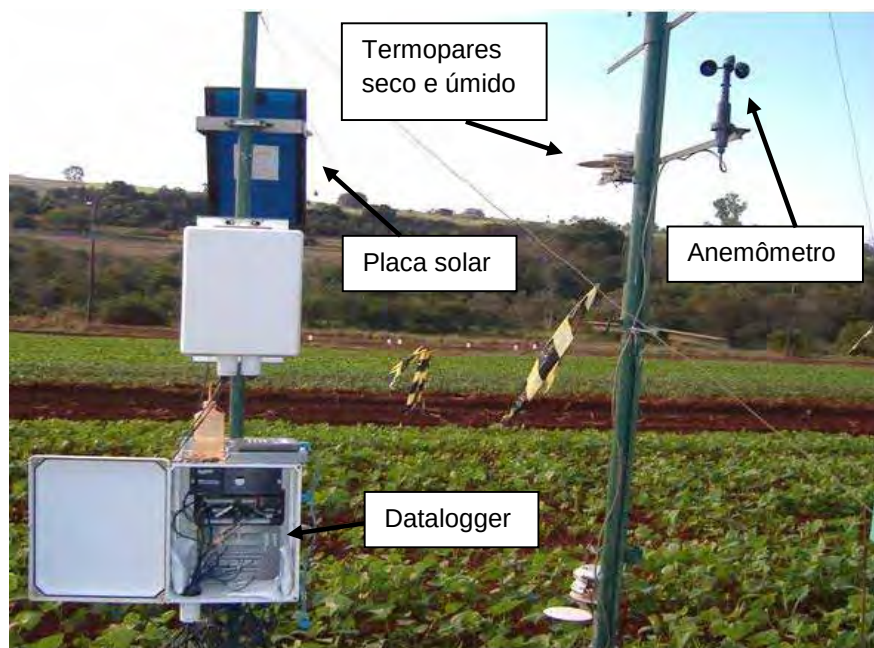


Figura 2. Vista do datalogger e dos sensores instalados na área experimental para a medição das variáveis do método da razão de Bowen.

O sistema foi instalado no campo, em 17 de junho de 2010, efetuando-se o posicionamento correto dos sensores e observando-se os valores registrados para a verificação da integridade dos dados. A partir de 22 de junho de 2010, os dados começaram a ser registrados no sistema de aquisição de dados, sendo os valores de

Rn e de G somados em períodos de 15 minutos, e os demais sensores, calculados como médias desse período.

A Rn foi obtida com um saldo radiômetro (Figura 3) marca Kipp&Zonen, instalado a 2 m acima da cobertura vegetal.



Figura 3. Saldo radiômetro instalado na área experimental.

O fluxo de calor no solo foi medido por meio de um fluxímetro marca Rebs, instalado a 0,03 m abaixo da superfície do solo. O instrumento possui um fator de calibração de $39,6 \text{ W m}^{-2}\text{mV}^{-1}$, resistência de $2,0 \Omega$ e condutividade térmica de $1,22 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

A velocidade do vento foi medida com um anemômetro, modelo 03001 RM Young Co (Figura 4), com limite de funcionamento entre $0,2$ e 50 m s^{-1} , liberando pulsos proporcionais à velocidade do vento. Os anemômetros foram colocados a $0,2$ e $1,5 \text{ m}$ acima do dossel da cultura.



Figura 4. Anemômetro instalado na área experimental.

A temperatura do ar e a pressão atual de vapor, em dois níveis de altura, foram obtidas com psicrômetros de termopares do tipo T (Figura 5), desenvolvidos por TURCO & FERNANDES (2001). Os sensores foram colocados a 0,2 e 1,5 m acima da cultura. A temperatura foi obtida com uma acurácia de $\pm 1^\circ\text{C}$. Os termopares tipo T foram conectados em duas entradas do Datalogger, programadas como diferencial e fundo de escala igual a 2,2 mV.

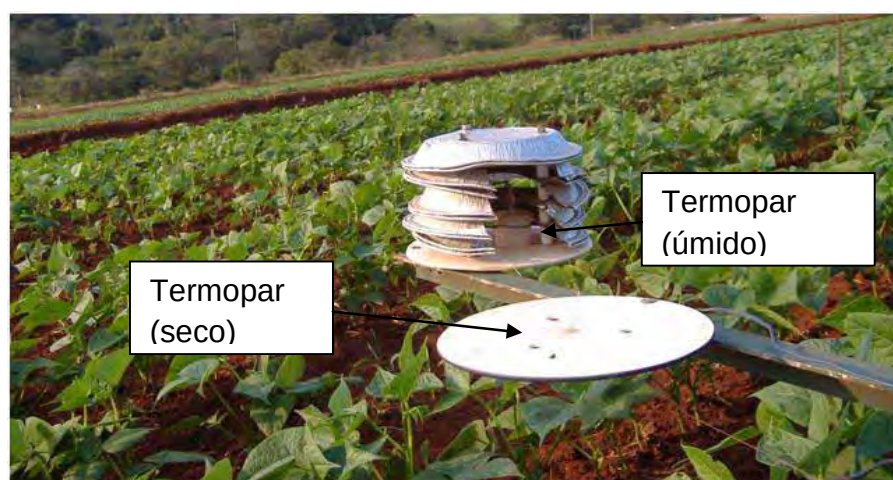


Figura 5. Psicrômetro de termopares instalado na área experimental.

O posicionamento dos sensores acima da cobertura vegetal foi escolhido para estabelecer uma adequação entre precisão, representatividade das medidas e definição correta das alturas, determinadas de acordo com as seguintes premissas (ITIER et al., 1985):

Z representa dois níveis acima da superfície vegetal, sendo que:

- z_1 deve estar na camada de fluxo turbulento;
- z_2 deve estar na camada de fluxo constante;
- z_2 e z_1 devem estar distantes o suficiente para medir diferenças de velocidade do vento e temperatura com suficiente precisão.

Com vistas a esses aspectos, foram escolhidas as alturas: $z_1 = 0,20$ e $z_2 = 1,50$ m.

Os valores de LE a cada 15 minutos foram convertidos em ET_c, de acordo com as seguintes equações:

$$ET_{c\ 15\ min} = \frac{0,0009 LE}{\lambda} \quad (14)$$

Em que,

ET_c – evapotranspiração diária da cultura, mm 15 min⁻¹;

LE – fluxo de calor latente, W m⁻² em 15 min;

0,0009 fator de conversão de W m⁻² para MJ m⁻² 15 min⁻¹;

λ – calor latente de vaporização da água, 2,45 MJ kg⁻¹.

Para a obtenção da ET_c diária, realizou-se a somatória das ET_c 15 min.

Foram instaladas três baterias de tensiômetros com cápsula de cerâmica microporosa, nas profundidades de 0,20; 0,40 e 0,60 m, na parte central da parcela, com a finalidade de acompanhar a variação da tensão da água no solo.

3.4.5 Penman-Monteith (PM)

Para este método, a ETc foi calculada com as mesmas equações (7) e (8), sendo que a evapotranspiração diária de referência (ETo) foi estimada pelo método de Penman-Monteith, modificado (FAO 56), proposto por ALLEN et al. (2006) e adaptado para a determinação da ETc a cada 15 minutos, conforme a expressão:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \left(\frac{9,375}{(T + 273)}\right) U_2(e_s - e_a)}{\Delta \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (15)$$

Em que,

ETo – Evapotranspiração de referência (mm 15 min⁻¹);

Rn– saldo de radiação na superfície gramada (MJ m⁻²15 min⁻¹);

G – densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻²15 min⁻¹);

T – temperatura média do ar a 2 m de altura (°C);

U₂– velocidade média do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s– pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar em 15 min (kPa);

e_a– pressão real ou atual de vapor (kPa);

e_s - e_a – déficit de pressão de vapor (kPa);

Δ–declive da curva de pressão de vapor versus temperatura (kPa °C⁻¹);

γ– constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Declive da curva de pressão de vapor de saturação (Δ)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (16)$$

Constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (17)$$

Em que,

P – é a pressão atmosférica, kPa;

λ – calor latente de vaporização da água; $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$;

c_p – calor específico à pressão constante; $1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

ε – relação entre o peso molecular do vapor de água e do ar seco = 0,622.

$$P = 1013 \left(\frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad (18)$$

Em que,

z – elevação acima do nível do mar (altitude) (m);

Pressão de saturação de vapor (e_s).

$$e_s = 0,61078 \exp \left[\frac{17,27 T}{(T + 237,3)} \right] \quad (19)$$

Em que,

T – temperatura média do ar em 15 min ($^\circ\text{C}$);

$\exp [..]$ 2,7183 – (base do logaritmo natural) elevado à potência [..].

$$e_a = e_s(T_u) - \gamma_{psi} (T - T_u) \quad (20)$$

Em que,

e_a – pressão real ou atual de vapor (kPa);

e_s – pressão de saturação de vapor à temperatura do bulbo úmido (kPa);

γ_{psi} – constante psicrométrica do instrumento ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

T – temperatura do termômetro de bulbo seco, média de (15 min, $^\circ\text{C}$);

T_u – temperatura do termômetro de bulbo úmido ($^\circ\text{C}$).

A constante psicrométrica do instrumento é dada por:

$$\gamma_{\text{psi}} = a_{\text{psi}} P \quad (21)$$

Em que,

$$a_{\text{psi}} = 0,000800.$$

Na aplicação da equação (20), houve erro no cálculo da pressão real de vapor, pois o cálculo da e_s foi feito com a temperatura média de 15 min do bulbo seco (T) e não com (T_u), e a constante psicrométrica utilizada não foi a do aparelho (γ_{psi} – equação 21) e, sim, a da equação (17), usada na equação (15). Portanto, a equação utilizada foi a que se segue:

$$e_a = e_s(T) - \gamma (T - T_u) \quad (22)$$

Esses dois erros resultaram em valores de e_a próximos aos de e_s , ou seja, os valores do déficit de pressão de saturação da equação (15) foram muito pequenos, o que resultou em valores de ET_c inferiores aos calculados de forma correta. Como esses erros só foram detectados depois de terminado o experimento, o cálculo da ET_o com a utilização da equação (22), no lugar da (20), resultou em valores subestimados de ET_c que não puderam ser corrigidos. As consequências desses erros vão ser apontadas e discutidas em Resultados e Discussão.

Denominou-se de ET_{oPM}^* à equação (15) em que e_a foi calculado com a expressão (22) e de ET_{cPM}^* à ET_c estimada com ET_{oPM}^* .

Depois de terminado o experimento, procedeu-se à correção dos valores de ET_o por meio da aplicação na equação (15) do cálculo correto de e_a (equação 20) e de novos cálculos de ET_{cPM} , estabelecendo-se a simulação de um possível cenário de irrigação se os erros não tivessem ocorrido e as estimativas da produtividade de grãos e da eficiência de uso de água de irrigação, baseadas nos resultados obtidos com as lâminas de irrigação (h_{LC} e h_{LR}) propiciadas pelos tratamentos, inclusive o ET_{cPM}^* .

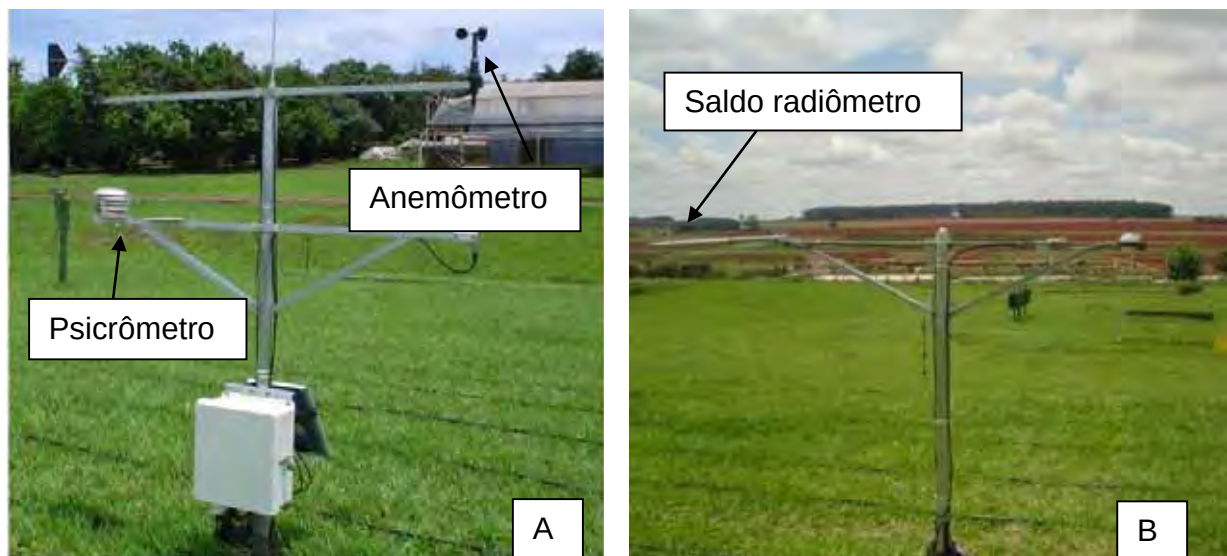
As variáveis climatológicas necessárias para a estimativa da ET_o por este método foram obtidas a cada quinze minutos, em uma estação meteorológica automatizada da marca Campbell Scientific, instalada em área do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP (Figuras 6a e 6b),

cultivada com grama-batatais (*Paspalum notatum* L) com, no mínimo, 10 m de bordadura, irrigada por um sistema de gotejamento e mantida entre 0,08 e 0,12 m de altura, localizada a aproximadamente 800 m da área onde foi realizado o experimento. Foram utilizados os dados dos seguintes sensores: psicrômetro de termopares (TURCO & FERNANDES, 2001), para medida da temperatura e cálculo da umidade relativa do ar; anemômetro modelo 03001 RM Young Co para medida da velocidade do vento e saldo radiômetro modelo NR LITE Kipp&Zonen para medida do saldo de radiação.

A umidade relativa do ar (UR) foi calculada com os dados psicrométricos, aplicando-se a equação:

$$UR (\%) = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad (23)$$

Em que e_s e e_a foram calculadas por meio das equações (18) e (19).



Figuras 6a e 6b. Estação meteorológica automatizada instalada na área do departamento de Engenharia Rural da UNESP-FCAV.

Ao final do ciclo da cultura, avaliaram-se os seguintes componentes de produtividade: estande final, número médio de vagens produtivas por planta, número

médio de grãos por vagem, produtividade de grãos (13% de umidade) e eficiência da água aplicada (EAA kg m⁻³).

Para a estimativa do estande final, número de vagens por planta e número médio de grãos por vagem, foi marcado de forma aleatória um metro linear com quatro repetições em cada parcela, para posterior contagem do número de plantas, de vagens e de grãos por vagem.

A eficiência da água aplicada (EAA, kg m⁻³), definida como eficiência de produção, ou seja, a massa de grãos produzida para cada unidade de volume de água aplicada, baseada na estimativa da evapotranspiração durante todo o ciclo da cultura, foi obtida pelo quociente entre o rendimento da cultura e o volume total de água aplicada, de acordo com a equação 18 (MONTEIRO et al., 2008).

$$EAA = \frac{R_c}{V_A} \quad (24)$$

Em que,

EAA – eficiência da água aplicada (kg m⁻³);

R_c – rendimento da cultura (kg ha⁻¹);

V_A – volume de água aplicado durante o ciclo da cultura.

Quanto a esses componentes de produtividade, o efeito dos tratamentos foi avaliado por meio de análise de variância, pelo teste F, a 5% e 1% de probabilidade, e por comparação de médias pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

3.5.2 Avaliação do cenário possível simulado com o tratamento da estimativa da ETc pelo método de Penman-Montheith FAO-56 correto

Tendo em vista que o erro cometido no cálculo da estimativa de ETo pelo método de PM-FAO56 só foi percebido depois de terminado o experimento, conforme descrito no item 3.4.5, o que resultou nos valores dos componentes de produtividade que serão discutidos em Resultados e Discussão, resolveu-se recalcular os valores de

ETo corrigidos, obtendo-se os novos valores diários de ETc. Com isso, a partir dos 26 DAE, foram recalculadas as irrigações em um cenário que poderia ter acontecido.

Para a simulação dos resultados possíveis para os componentes de produtividade, como os tratamentos geraram lâminas líquidas calculadas (hLC) e reais totais (hLR) aplicadas diferentes, procedeu-se à análise de regressão entre essas lâminas e entre as hLR e cada um dos componentes de produção de cada tratamento. Com o valor de hLC recalculado no novo cenário, foi possível, por meio das equações de regressão significativas obtidas, a simulação do valor provável de hLR que seria produzido, e, com esse valor, estimar os valores prováveis dos componentes de produtividade nesse novo cenário.

IV RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função do erro ocorrido no cálculo da ET_0 com o método de Penman-Monteith para a obtenção da evapotranspiração da cultura (ET_c PM*), conforme foi explicado no item 3.4.5 de Material e Métodos, o item Resultados e Discussão será dividido em dois subitens. O primeiro tratará da apresentação e da discussão dos dados como foram obtidos, ou seja, a comparação dos resultados dos tratamentos considerando o erro relatado no cálculo de ET_c com o método de PM (ET_c PM*) e as consequências resultantes da aplicação de cada tratamento na duração do ciclo e nos fatores de produtividade; o segundo subitem tratará da apresentação e da discussão do cenário possível se não houvesse ocorrido o erro no cálculo de ET_c no método de Penman-Monteith (ET_c PM).

4.1 Considerando os dados como foram obtidos – cenário do experimento

Os dados climatológicos do período, medidos na estação automatizada instalada na área experimental, são apresentados na Tabela 3, onde se pode observar que as temperaturas médias diárias mensais, entre 19 e 20 °C, estão de acordo com as recomendadas para o feijoeiro, conforme DOORENBOS & KASSAM (1994), entre 15 e 20 °C. A temperatura média máxima diária para seu crescimento é de 27 °C, e a mínima, de 10 °C. Não houve chuva no período de desenvolvimento do experimento, de forma que toda a água recebida pela cultura foi proveniente da irrigação. A umidade relativa permaneceu na faixa de baixa para média, e a velocidade média do vento foi baixa, conforme classificação apresentada por DOORENBOS & KASSAN (1994), na tabela de coeficiente de tanque (kt) para o tanque Classe A, apresentado no anexo 1.

Tabela 3. Caracterização climática na área experimental durante a condução do experimento.

Meses	Temp, média (°C)			UR média (%)	Chuva (mm)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Saldo de radiação (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
	Máxima	Mínima	Média				
Junho	28,3	9,5	18,9	56,5	0,0	0,92	11,05
Julho	29,2	11,0	20,1	51,9	0,0	1,17	10,64
Agosto	29,1	10,1	19,6	39,9	0,0	1,24	12,50
Média	28,9	10,2	19,5	55,0	0,0	1,11	11,40

Pode ser observado na Figura 7, que ao se comparar a ETc estimada com erro no método de Penman-Monteith - ETcPM*, com a estimada pelo método do tanque Classe A – ETc TCA (Figura 7 A), verifica-se que, a partir dos 43 DAE, a ETc TCA foi maior que a ETc PM* até a última irrigação, que ocorreu aos 80 DAE para o tratamento ETc PM* e aos 83 DAE para o ETc TCA. As plantas do ETc PM* já se apresentavam em avançado estágio de senescência das folhas, e as vagens já estavam com coloração creme, características de finalização do ciclo, enquanto as plantas do ETc TCA apresentaram esses sinais somente 3 dias após, aos 83 DAE. Em relação ao ETc RB (Figura 7 B), os valores de ETc calculados por PM* foram menores até os 39 DAE, e a partir daí até os 68 DAE, os valores de ETc foram semelhantes, para depois ETc PM* voltar a ser menor do que ETc RB. A irrigação das plantas, de acordo com a ETc RB, se estendeu-se até os 88 DAE. Os valores de ETc TCA foram, no geral, menores que os de ETc RB até os 40 DAE (Figura 7 C) e maiores daí até os 83 DAE.

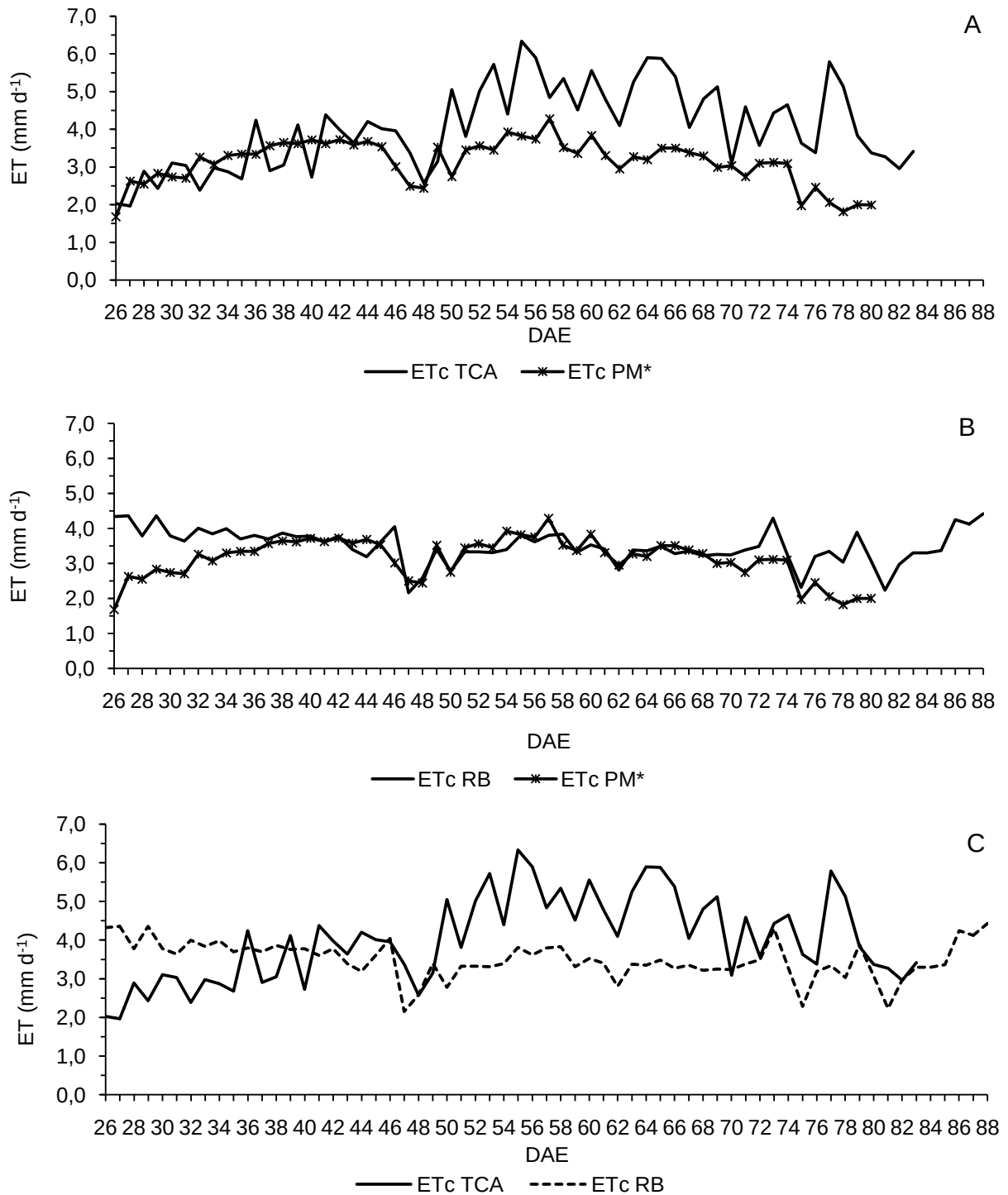


Figura 7. Curvas de evapotranspiração da cultura (ETc) no cenário do experimento: A – método do tanque classe A (ETc TCA) e de Penman-Monteith com cálculo errôneo (ETc PM*); B – método da Razão de Bowen (ETc RB) e de Penman-Monteith com cálculo errôneo (ETc PM*); C - método do tanque classe A (ETc TCA) e da Razão de Bowen (ETc RB).

A fase exclusivamente vegetativa do desenvolvimento das plantas ocorreu da emergência até os 45 DAE, quando apareceram os primeiros botões florais (I e Veg-BF). As primeiras flores abriram aos 47 DAE, e as primeiras vagens foram visíveis aos 55 DAE (F – IV). Como a cultivar Pérola é de crescimento indeterminado, o crescimento vegetativo continua mesmo após a emissão de botões florais e vagens. A fase de crescimento, enchimento e início da maturação fisiológica das vagens (EV – M) ocorreu dos 56 aos 77 DAE, e a fase final (M – Final) contada daí até a última irrigação, que ocorreu em momentos diferentes em cada tratamento. A última irrigação do ciclo foi definida quando a planta já estava em processo de senescência, com amarelecimento e queda das folhas e as vagens já tinham atingido a cor creme, evidências da fase final de maturação dos frutos, características descritas por DOURADO NETO & FANCELLI (2000). No tratamento PM*, a última irrigação ocorreu aos 80 DAE, enquanto no TCA foi aos 83 DAE; aos 86 DAE no Tens, e aos 88 DAE no RB.

O balanço médio de energia sobre a cultura com a irrigação manejada pelo método da razão de Bowen é apresentado na Tabela 4, onde pode ser observado que o maior percentual do saldo de radiação (R_n) foi utilizado, em todo o ciclo da cultura, como fluxo de calor latente – LE (87,8%). Ao longo do ciclo, da fase vegetativa para a de maturação, o percentual da LE na R_n diminuiu de 92,1; para 81,7%. Esses resultados concordam com os de ACOSTA (2009), que observou valores médios de 89,1 % para a cultura do girassol, e com FERNANDES (2001), que, afirma que em boas condições de suprimento de água no solo, o fluxo de calor latente é o maior consumidor da energia disponível em uma vegetação. O fluxo de calor sensível (H) representou 22,7% da R_n média do ciclo, e o fluxo de calor no solo foi negativo (-10,5%), porque foi considerado apenas o período em que o fluxo estava direcionado da superfície vegetada para o perfil do solo (durante o dia).

Tabela 4. Valores médios das percentagens dos fluxos de calor latente (LE/Rn), de calor sensível (H/Rn) e de calor no solo (G/Rn) durante os estágios de crescimento, de reprodução e de maturação em feijoeiro irrigado, obtidos com o método da razão de Bowen.

Fases fenológicas	Duração (DAE)	Partição do balanço de energia		
		LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
Vegetativa	0 – 45	92,1	25,0	- 17,1
Reprodutiva	46 - 66	89,6	17,8	- 7,4
Maturação	67 - 88	81,7	25,3	- 7,0
Média geral	-	87,8	22,7	- 10,5

Da emergência até os 26 DAE, foi a fase de estabelecimento da cultura no campo ou inicial (I). Nesta fase, não houve diferenciação dos tratamentos. Todos foram irrigados com as mesmas hLR, em 8 aplicações, entre as quais a efetuada aos 26 DAE com 30,0 mm, quando a cultura em toda a área já se encontrava estabilizada, para que a condição hídrica do solo, em todas as parcelas, fosse semelhante quando do início da diferenciação dos tratamentos a partir dos 27 DAE. Nessa fase inicial, a hLR total recebida por todos os tratamentos foi de 121,1 mm.

A partir dos 27 DAE, as irrigações passaram a ser realizadas somente quando o somatório dos valores diários da ETc estimada (hLC) com cada método atingisse valor em torno da lâmina crítica calculada, de 14,2 mm para o feijoeiro e para as características físico-hídricas do solo da área. Nota-se, na Tabela 5, que houve diferença de valores de hLC e de lâmina efetivamente recebida pela cultura (hLR) entre os tratamentos, nos períodos que representam a fase de pré-floração até o florescimento (Veg - BF), do florescimento até a formação das primeiras vagens (F-IV), enchimento de vagem até o início da maturação (EV - M) e do início da maturação até o momento da aplicação da última irrigação para cada tratamento (Final). Somando-se os 121,1 mm aplicados em 8 irrigações na fase inicial (I) às hLR recebidas e ao número de irrigações necessário para aplicar essas lâminas (Tabela 6), as plantas de cada tratamento receberam, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (semeadura à maturação fisiológica), lâminas totais de água de 404,9; 364,4; 344,3; 297,7 e 135,8 mm, distribuídos em 25; 24; 25; 20 e 9 aplicações, para TENS, TCA, RB, PM* e Test., respectivamente. Com exceção do Test., essas lâminas recebidas estão dentro da faixa

de 300 a 500 mm necessária para a produção máxima de grãos de feijão, de acordo com DOORENBOS & KASSAN (1994).

Tabela 5. Número de irrigações (NI) antes (até os 26 DAE) e após o início da diferenciação dos tratamentos e lâminas calculadas (hLC) e recebidas (hLR), médias e totais, conforme o tratamento de manejo de irrigação.

Períodos	DAE	Tratamentos	hLC (mm)	hLC (mm d ⁻¹)	hLR (mm)	NI	hLC média (mm)	hLR média (mm)
I	Até os 26 (26)	TENS	-	-	-	-	-	-
		TCA	-	-	-	-	-	-
		RB.	-	-	122,1	8	-	15,3
		PM*	-	-	-	-	-	-
		Test.	-	-	-	-	-	-
Veg - BF	27 – 45 (19)	TENS	63,5	3,3	61,5	3	21,2	20,5
		TCA	63,7	3,4	64,0	4	15,9	16,0
		RB	72,0	3,8	71,9	5	14,4	14,4
		PM*	62,4	3,3	63,0	4	15,6	15,8
		Test.	-	-	23,7 ^(a)	-	-	-
F - IV	46 – 55 (10)	TENS	47,1	4,7	42,2	3	15,7	14,1
		TCA	43,5	4,4	45,4	3	14,5	15,1
		RB	24,9	2,5	30,5	2	12,5	15,3
		PM*	28,6	2,9	30,5	2	14,3	15,3
		Test.	-	-	-	-	-	-
EV - M	56 – 77 (22)	TENS	113,9	5,2	128,9	8	14,2	16,1
		TCA	98,8	4,5	104,0	8	12,4	13,0
		RB	81,3	3,7	86,4	6	13,6	14,4
		PM*	67,2	3,1	69,1	5	13,4	13,8
		Test.	-	-	-	-	-	-
M – Final ^(b)	78 – 86	TENS	45,5	4,1	50,1	3	15,2	16,7
	78 – 83	TCA	27,8	2,5	28,9	2	13,9	14,5
	78 – 88	RB	37,9	3,4	38,4	3	12,6	12,8
	78 – 80	PM*	12,3	4,1	13,0	1	12,3	13,0
		Test.	-	-	-	-	-	-

^(a) Lâmina aplicada no tratamento Test. apenas para incorporar o fertilizante nitrogenado aplicado em cobertura aos 37 DAE; ^(b) Final refere-se à última irrigação realizada nas parcelas de cada tratamento.

(I) – fase inicial, (Veg - BF) – período vegetativo até início do florescimento, (F - IV) – início do florescimento ao início do aparecimento de vagens, (EV - M) – enchimento de vagem à maturação, (M - Final) – maturação ao final do ciclo.

As médias das lâminas recebidas pelas plantas (hLR) nos dias de irrigação, com exceção das do tratamento TENS, dos 27 aos 45 DAE, foram superiores às médias das lâminas calculadas (hLC) nesses dias para todos os tratamentos (Tabela 6), significando que, em tese, nenhum dos tratamentos provocou déficit hídrico no solo que pudesse promover nas plantas estresse por déficit hídrico.

Nas fases de desenvolvimento consideradas mais críticas, desde o início do florescimento (F) até ao de enchimento e maturação das vagens (M), o manejo de irrigação com os métodos TENS e TCA resultou em 3 irrigações a mais do que o RB e 4 a mais do que o PM*. TENS e TCA tiveram 11 irrigações, contra 8 do RB e 7 do TCA, nesse período (Tabela 5), de um total de 17 em TENS e TCA, 16 em RB e 12 em PM* (Tabela 6). Considerando que esse período durou 32 dias, o intervalo médio entre irrigações foi de 2,9 dias para o TENS e o TCA, de 4 dias para o RB e de 4,6 dias para o PM*.

Tabela 6. Número total de irrigações (NTI), lâminas líquidas calculadas (hLC) e recebidas (hLR) , totais e médias por tratamento e intervalo médio entre irrigações (IMI), durante o período de diferenciação dos tratamentos.

Tratamentos	^(a) NTI	ETc estimada ou hLC (mm)			hLR (mm)		IMI (dias)
		Total	Média por irrigação	Média a partir dos 26 DAE	Total	Média por irrigação	
		(mm)	(mm)	(mm d ⁻¹)	(mm)	(mm)	
TENS	17	270,0	15,9	4,4	282,8	16,6	3,6
TCA	17	233,8	13,8	3,8	242,3	14,3	3,6
RB	16	216,1	13,5	3,5	222,2	13,9	3,9
PM*	12	170,5	14,2	3,2	175,6	14,6	4,5
Test.	1	-	-		23,7 ^(b)	23,7	-

^(a) No tratamento PM*, a última irrigação ocorreu aos 80 DAE, no TCA aos 83 DAE, no TENS aos 86 DAE e no RB aos 88 DAE; ^(b) Lâmina aplicada no tratamento Test. apenas para incorporar o fertilizante nitrogenado aplicado em cobertura, aos 37 DAE.

A ETc média estimada durante o período de diferenciação dos tratamentos variou de 3,2 mm d⁻¹ para PM* a 4,4 mm d⁻¹ no tratamento TENS, com intervalo médio entre irrigações variando de 3,6 dias nos tratamentos TENS e TCA, a 4,5 dias no PM* (Tabela 5). Na fase mais crítica, do florescimento (F) até à maturação das vagens (M), a ETc estimada (hLC) foi maior no tratamento TENS, com 5,0 mm, depois no TCA, com

4,5 mm, seguido pelo RB e o PM* com valores semelhantes entre si, de 3,1 mm e 3,0 mm, respectivamente (Tabela 5).

Durante o período de diferenciação dos tratamentos, a partir dos 27 DAE, o manejo de irrigação por tensiometria (TENS) foi o que resultou na maior lâmina total aplicada (Tabelas 5 e 6). Em valores percentuais, a hLC total calculada por esse tratamento foi 15,5% maior do que a do TCA, 24,9% do que a do RB e 58,4% maior do que a do PM*; a do TCA foi 8,2% maior do que a do RB e 37,1% maior do que a do PM*, e a do RB foi 26,7% maior do que a do PM*. Nas fases mais críticas em relação ao efeito do déficit hídrico nos fatores de produtividade da cultura, F – IV e EV – M, comportamento semelhante ao do ciclo todo ocorreu, excetuando-se para RB e PM* na fase F – IV, em que RB estimou hLC 12,9% menor do que PM*. No entanto, na fase seguinte, EV – M, RB voltou a superar PM* em 21,0% (Tabela 7). Essa diferença entre estimativas de evapotranspiração verificada neste trabalho, entre alguns desses métodos, não foi encontrada por DANTAS NETO (1999). Este autor encontrou valor médio da evapotranspiração de referência (ET_0) para Mossoró – RN, obtido pelo método do Tanque Classe A, próximo ao valor médio de ET_0 obtido pelo método de Penman-Monteith (PM). PAVANI et al. (2008) verificaram que, em média, a evapotranspiração real média do feijoeiro, durante o ciclo, foi maior no manejo de irrigação pelo tanque classe A do que no manejo por tensiometria.

Tabela 7. Diferenças absolutas e percentuais entre os tratamentos, das lâminas líquidas calculadas (hLC), em cada fase de desenvolvimento da cultura.

Diferença entre tratamentos	27 - 45 (DAE) (Veg - BF)		46-55 (DAE) (F - IV)		56-77 (DAE) (EV - M)		78-88 (DAE) (M - Final)		Total	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
TENS - TCA	-0,2	-0,3	+3,6	+8,3	+15,1	+15,3	+17,7	+63,7	+36,2	+15,5
TENS - RB	-8,5	-11,8	+22,2	+89,2	+32,6	+40,1	+7,6	+20,1	+53,9	+24,9
TENS - PM*	+1,1	+1,8	+18,5	+64,7	+46,7	+69,5	+33,2	+269,9	+99,5	+58,4
TCA - RB	-8,3	-11,5	+18,6	+74,7	+17,5	+21,5	-10,1	-26,6	+17,7	+8,2
TCA - PM*	+1,3	+2,1	+14,9	+52,1	+31,6	+47,0	+15,5	+126,0	+63,3	+37,1
RB - PM*	+9,6	+15,4	-3,7	-12,9	+14,1	+21,0	+25,6	+208,1	+45,6	+26,7

Comparando-se os dois tratamentos em que havia tensiômetros instalados nas parcelas (TENS e RB), observa-se, nas Tabelas 5 e 7, que a quantidade de água recebida inicialmente pela cultura, no manejo da irrigação realizado pelo método da RB (27 – 45 DAE), foi maior do que a calculada pelo método de tensiometria (TENS); porém, nas fases seguintes, as quantidades de água foram menores em RB do que em TENS. A partir dos 51 DAE, verifica-se pela Figura 8 que as lâminas recebidas (hLR) pelas plantas no tratamento RB, em função das lâminas calculadas (hLC) por esse método, não foram suficientes para restituir ao solo, na zona radicular (0 a 60 cm de profundidade), a água efetivamente retirada pela cultura por evapotranspiração, principalmente no período desde o florescimento (F) até o de maturação das vagens (M) fazendo com que os potenciais matriciais do solo, medidos diariamente com os tensiômetros, fossem gradativamente tornando-se mais negativos, mesmo com as irrigações sendo realizadas nesse período. Isso significa que a taxa média diária de evapotranspiração real da cultura, nessas fases, foi maior do que a taxa média diária calculada com a aplicação do método da RB. Já, o método TENS, por monitorar a variação do conteúdo de água no solo por meio da variação direta do potencial mátrico, na zona radicular, resultou em maior hLC média diária nesse período, 5,0 mm d⁻¹ para o TENS e 3,1 mm d⁻¹ para o RB, e em menor intervalo médio entre irrigações, 2,9 dias e 4,0 dias, respectivamente (Tabela 5). Esse acompanhamento real da extração de água pela cultura, resultando em maior frequência de aplicação de água com o método TENS, permitiu que as irrigações mantivessem o conteúdo de água no solo, nas profundidades de 20 cm, 40 cm e 60 cm mais próximos aos da capacidade de campo do solo (-10 kPa – Figura 8), mantendo o sistema radicular com maior conforto hídrico.

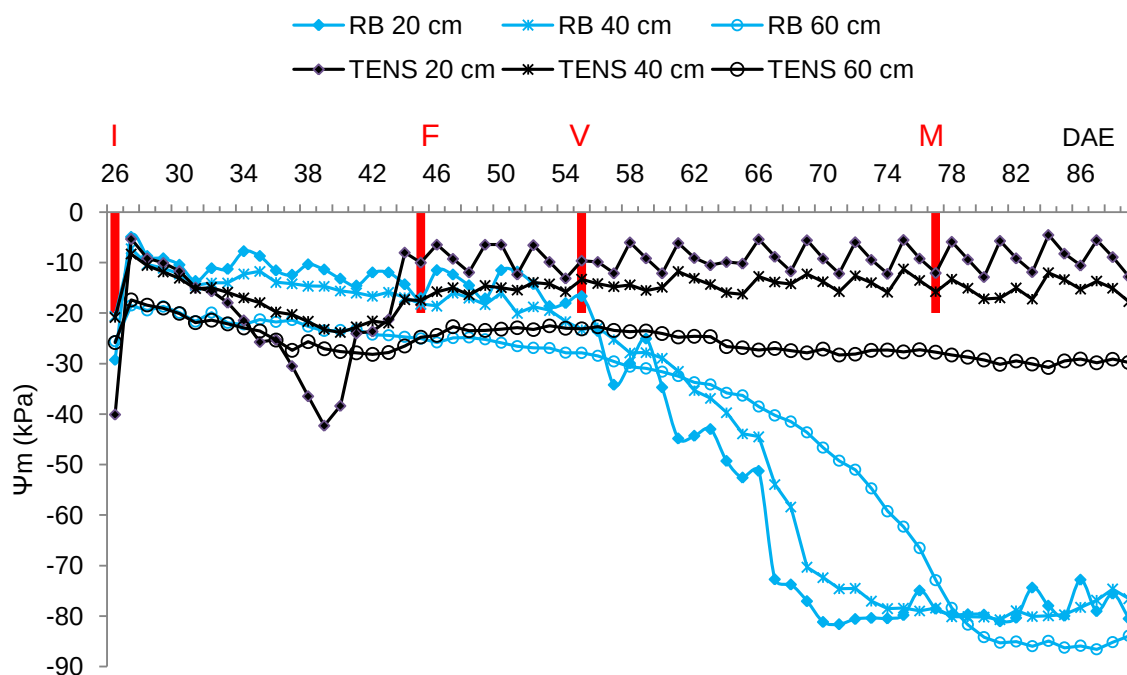


Figura 8. Variação do potencial da água no solo (Ψ_m) nos tratamentos manejados com RB e TENS, nas profundidades de 20; 40 e 60 cm, desde o início da diferenciação dos tratamentos (I) até o florescimento (F), do florescimento até o início do aparecimento das vagens (V) e durante a fase de crescimento, enchimento e maturação das vagens (V – M).

Todos os fatores de produção e a eficiência de uso da água aplicada foram significativamente influenciados pelos tratamentos (Tabela 8). O estresse por déficit hídrico sofrido pelas plantas do tratamento Test., por não terem recebido água a partir dos 27 DAE, nem por chuva nem por irrigação, causou prejuízos significativos tanto nos fatores de produção quanto na eficiência de uso da água aplicada (Probabilidade < 0,05), apresentando valores significativamente menores dessas variáveis em relação aos demais tratamentos (Tabela 9), evidenciando que o déficit hídrico foi severo a ponto de reduzir em cerca de 42% a população final de plantas em relação à média do estande final entre os demais tratamentos. No entanto, a produtividade de grãos não reduziu apenas porque a população de plantas reduziu, mas também devido às reduções significativas nos números de vagens por planta e de grãos por vagem.

Tabela 8. Resumo da análise de variância dos fatores de produção (estande final, vagens/planta, grãos/por vagem e produtividade de grãos) e eficiência da água aplicada (EAA).

Causas de variação	Tratamentos		Resíduo	Total	
Graus de Liberdade	4		15	19	
Fatores analisados	Estande final (plantas ha ⁻¹)	Vagens/planta (n ^o)	Grãos/vagem (n ^o)	Produtividade (kg ha ⁻¹)	EAA (kg m ⁻³)
Quadrado Médio	6486910617,3	26,4250	1,5720	4389715,1750	0,176045
Probabilidade	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0003	< 0,0001	< 0,0001
Coeficiente de Variação (%)	6,01	4,39	9,60	8,19	8,25

Tabela 9. Fatores de produção da cultura do feijoeiro e eficiência da água aplicada (EAA)^(a).

Manejo da Irrigação	Estande Final (plantas ha ⁻¹)	N ^o de vagens por planta	N ^o de grãos por vagem	Produtividade (kg ha ⁻¹)	EAA (kg m ⁻³)
TENS	209.722,50 a	11,00 a	4,75 a	2.935,50 a	0,7250 ab
TCA	212.500,25 a	11,25 a	4,25 a	2.686,75 a	0,7375 a
RB	215.278,00 a	11,00 a	4,00 a	2.660,00 a	0,7725 a
PM*	211.111,25 a	7,75 b	4,25 a	1.808,50 b	0,6075 b
Test.	122.222,25b	5,50 c	3,05 b	382,75 c	0,2625 c
DMS (%) ^(b)	25.493,234	0,891	0,851	374,420	0,1119

^(a)Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05); ^(b)Diferença mínima significativa.

Os tratamentos de manejo da irrigação por TENS, TCA, RB e PM* não diferiram entre si (Probabilidade > 0,05) quanto aos fatores de produção estande final e número médio de grãos por vagem, havendo diferença apenas para o número de vagens por planta (P<0,05), que foi 30% menor no PM*, resultando em redução de 34% na produtividade de grãos, neste tratamento, em relação à média entre os outros três tratamentos. Esses resultados diferem parcialmente dos obtidos por PAVANI et al. (2008), que encontraram diferença significativa tanto para o n^o de vagens por planta (TENS 6,47 e TCA 9,09) quanto para o número médio de grãos por vagem (TENS 3,46 e TCA 3,84), quando compararam os manejos de irrigação por tensiometria e por tanque Classe A, em feijoeiro conduzido no sistema plantio convencional, proporcionando produtividade de 1.865,6 e 3.394,6 kg ha⁻¹, respectivamente, para os tratamentos TENS e TCA.

Considerando que, apesar de ter produzido lâminas de irrigação menores do que as produzidas pelos tratamentos TENS e TCA (Tabelas 5, 6 e 7), o RB não se

diferenciou desses tratamentos quanto aos fatores de produção, à produtividade de grãos e à eficiência de uso da água aplicada. Pode-se inferir que a redução crescente do potencial mátrico do solo na zona radicular da cultura, nesse tratamento, verificada a partir dos 51 DAE (Figura 8), apesar das irrigações aplicadas, não influenciou no crescimento e no desenvolvimento das plantas desse tratamento. Por raciocínio análogo, considerando que o erro de cálculo que resultou em PM*, produziu lâminas de irrigação que, no geral, foram inferiores às do RB, provavelmente ocorreu nas parcelas do PM* redução mais acentuada do potencial mátrico do solo na zona radicular das plantas do que a verificada em RB, durante as fases críticas da cultura (florescimento à maturação das vagens), que produziu estresse hídrico evidenciado pela redução no número de vagens por planta, que por sua vez resultou em menores produtividades de grãos e eficiência de uso da água aplicada. Esses resultados corroboram os de NUÑEZ BARRIOS & FOSTER (1996), que observaram, em trabalho com estresse hídrico em feijão, em Michigan, Estados Unidos, que o número de vagens por planta foi muito afetado pelo déficit hídrico. No entanto, para LOPES et al. (2004), o manejo de irrigação por tensiometria em feijoeiro resultou em maior eficiência de uso da água de irrigação do que a obtida pelo balanço hídrico simplificado com o tanque Classe A, resultando em economia de 15% na água de irrigação aplicada, sem afetar a produtividade de grãos. DOORENBOS & KASSAN (1994) afirmam que a eficiência de utilização de água para sementes, com aproximadamente 10 % de umidade, situa-se entre 0,3 e 0,6 kg m⁻³.

Analisando-se a Figura 9, verifica-se que os tratamentos TENS, TCA e RB receberam maior lâmina que o tratamento PM* devido a menores intervalos médios entre irrigações (Tabela 6) ocorridos durante o desenvolvimento da cultura, apresentando maior produção de grãos, corroborando FERNANDES (2008), que verificou que os tratamentos irrigados com maior frequência apresentaram maior produção de grãos. MONTEIRO et al. (2010), em experimento com a cultivar Pérola de feijão, em Piracicaba – SP, observaram que os maiores valores de índice de área foliar, altura de planta, produtividade, número de grãos por vagem e número de vagem por planta foram encontrados nas plantas que receberam maiores quantidades de água (406,2 mm).

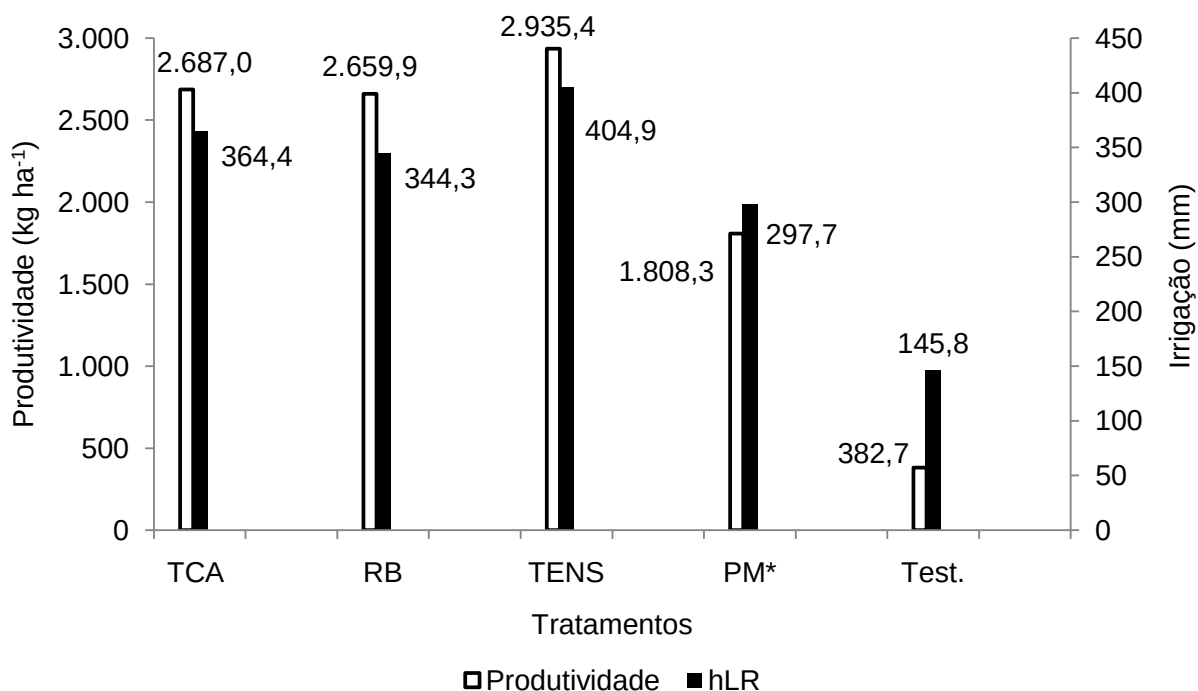


Figura 9. Produtividade do feijoeiro em função do total de água recebida durante o ciclo da cultura.

4.2 Cenário provável, considerando o cálculo correto de ET_0 com o método de Penman-Monteith (PM) – cenário novo

O cálculo correto da ET_0 com o método de PM (ET_0 PM) produziu valores superiores aos obtidos em função do erro (ET_0 PM*) (Figura 10), em todo o ciclo da cultura, o que levou a valores de ET_c também superiores (Figura 11). Assim, esse novo cenário apresentará como poderia ter sido o manejo da irrigação com os valores corretos de ET_c PM e os resultados prováveis dos fatores de produção e de eficiência de uso da água aplicada que seriam obtidos.

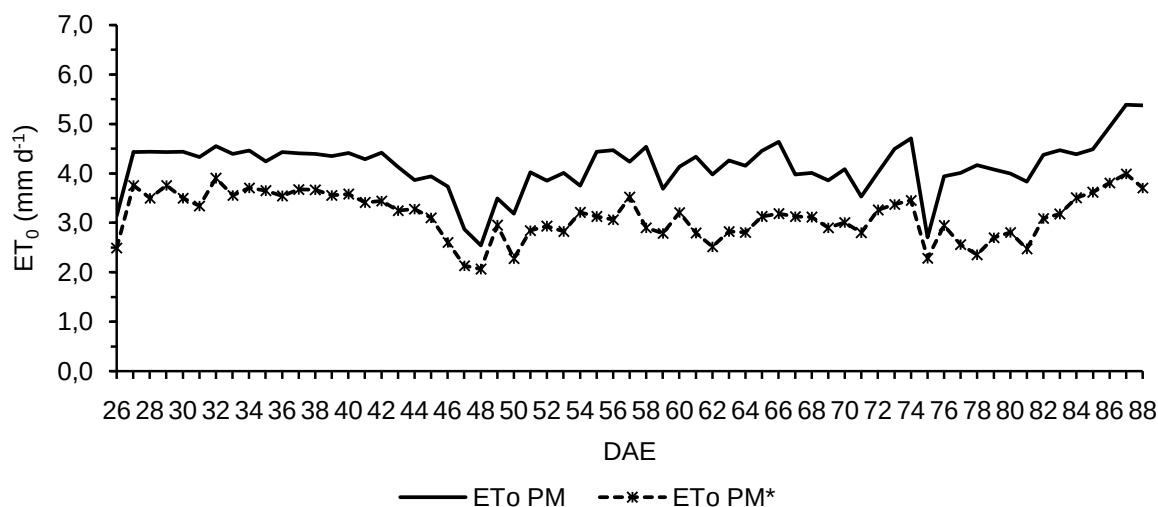


Figura 10. Evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith com erro no cálculo original (ET_0 PM*) e sem erro (ET_0 PM).

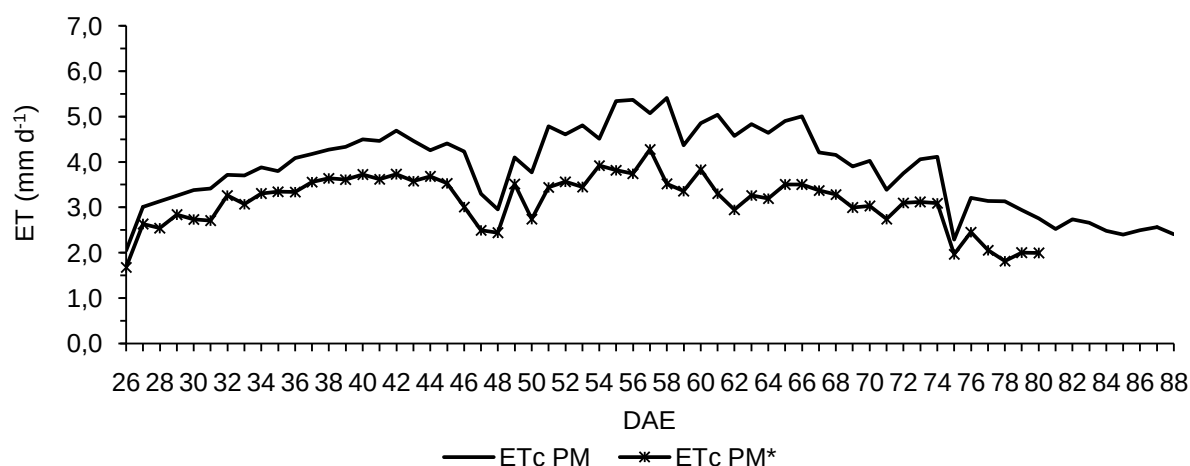


Figura 11. Curvas obtidas com os dados diários de ET_c a partir do erro de cálculo da ET_0 (ET_c PM* - cenário com os dados como foram obtidos) e do cálculo correto (ET_c PM - cenário corrigido).

Para o estabelecimento desse cenário, utilizaram-se os resultados reais obtidos e, com eles, estabeleceram-se regressões entre lâminas calculadas (h_{LC}) e lâminas recebidas (h_{LR}) e entre h_{LR} e os parâmetros de produção. Com as equações obtidas e com o valor correto de h_{LC} estimado com o método de Penman-Monteith (ET_0 PM), foi possível apresentar esse cenário.

Comparando-se os resultados do cenário do experimento com esse novo cenário, verifica-se que, em relação à curva de ETc TCA (Figura 7-A repetida a seguir como Figura 12-A para facilidade de visualização), a curva correta de ETc PM (Figura 12 B), apresentou valores de ETc sempre superiores aos de TCA, dos 26 DAE aos 47 DAE, período em que, no cenário do experimento, ocorreu alternância entre os valores desses tratamentos para, depois, a partir dos 48 DAE, os valores de ETc TCA superarem sempre os de ETc PM*. No cenário novo, a partir dos 48 DAE é que houve alternância entre os valores de TCA e PM até os 72 DAE, e daí em diante ETc TCA manteve-se superior a ETc PM.

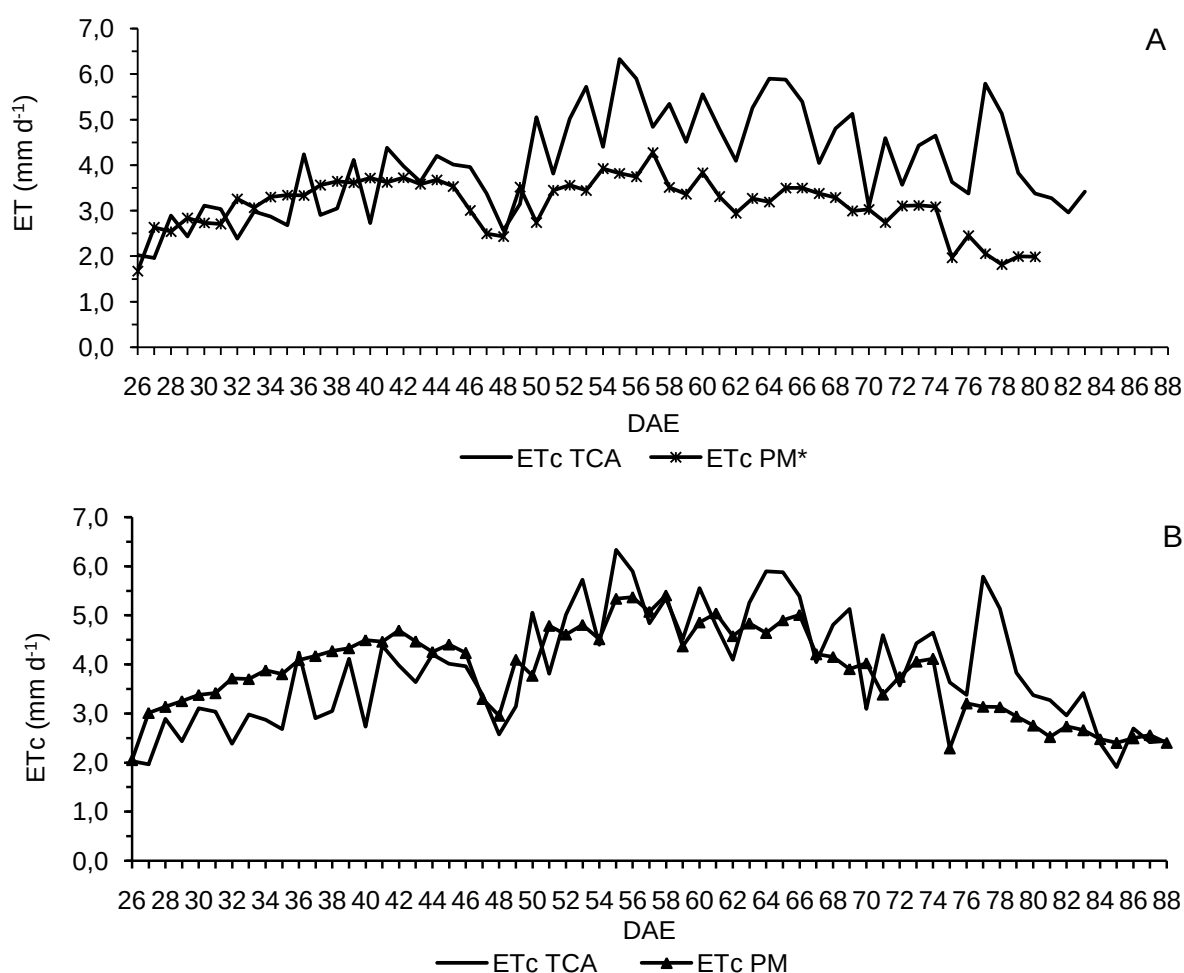


Figura 12. Evapotranspiração da cultura (ETc) estimada pelos métodos do Tanque Classe A (TCA) e Penman-Monteith (PM) A – cenário do experimento; B – cenário novo.

Em relação à RB, no cenário do experimento (Figura 7-B repetida a seguir como Figura 13-A para facilidade de visualização), verifica-se que, dos 26 DAE até os 39 DAE, os valores de ETc PM* foram todos menores do que os de ETC RB, enquanto no cenário novo (Figura 13-B) isso se verificou somente até os 34 DAE, mantendo-se depois os valores de ETC PM superiores aos de ETC RB até os 71 DAE, para depois manter-se igual ou inferior. No cenário do experimento, após os 39 DAE, ocorreu boa aderência entre as duas curvas, com pequena diferença entre os valores, até os 68 DAE. Depois disso, os valores de ETc PM* passaram a ser menores do que os da RB.

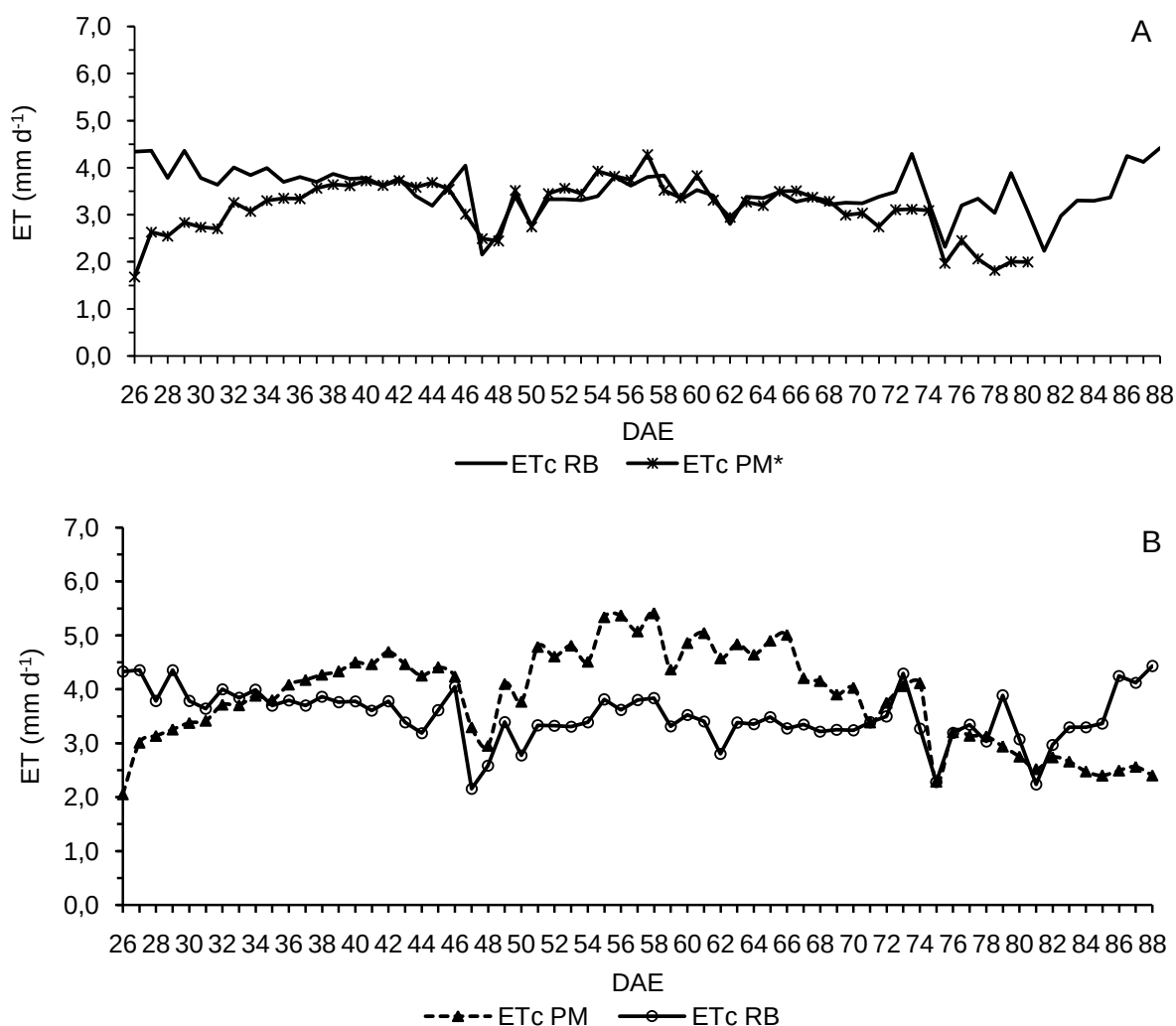


Figura 13. Evapotranspiração de cultura (ETc) estimada pelos métodos de Penman-Monteith (PM) e razão de Bowen (RB); A – cenário do experimento; B – cenário novo.

Em função da característica de cada um dos métodos, verifica-se que os métodos do Tanque Classe A e de PM têm comportamentos semelhantes (Figura 12-B), por partirem de ET_0 para a estimativa de ET_c com a utilização do coeficiente de cultura (K_c). Como os valores iniciais de K_c adotados para a cultura são baixos no início e depois vão aumentando até um ponto máximo e diminuem novamente até a colheita, seguindo o modelo exponencial representado na equação 8, isto significa que os valores da ET_c , para culturas de ciclo curto como o feijoeiro (aproximadamente 100 dias), crescem com o crescimento da cultura em altura e em área foliar até a fase de florescimento, de formação e de maturação dos frutos, e diminuem depois, em função da diminuição da área foliar ativa por senescência e, no caso do feijoeiro, também por queda das folhas. Assim, os valores estimados de ET_c com TCA e com PM seguiram esse comportamento, com variações diárias em função das variáveis climatológicas das quais dependem para a estimativa de ET_0 .

Analisando-se conjuntamente as Figuras 13-B e 14, verifica-se que a curva de ET_c obtida com o modelo RB, o qual estima a ET_c a partir do balanço de energia na superfície, tem comportamento mais semelhante à da ET_0 PM (Figura 14) do que à da ET_c PM (Figura 13-B), embora com valores inferiores aos de ET_0 PM em quase todo o período avaliado.

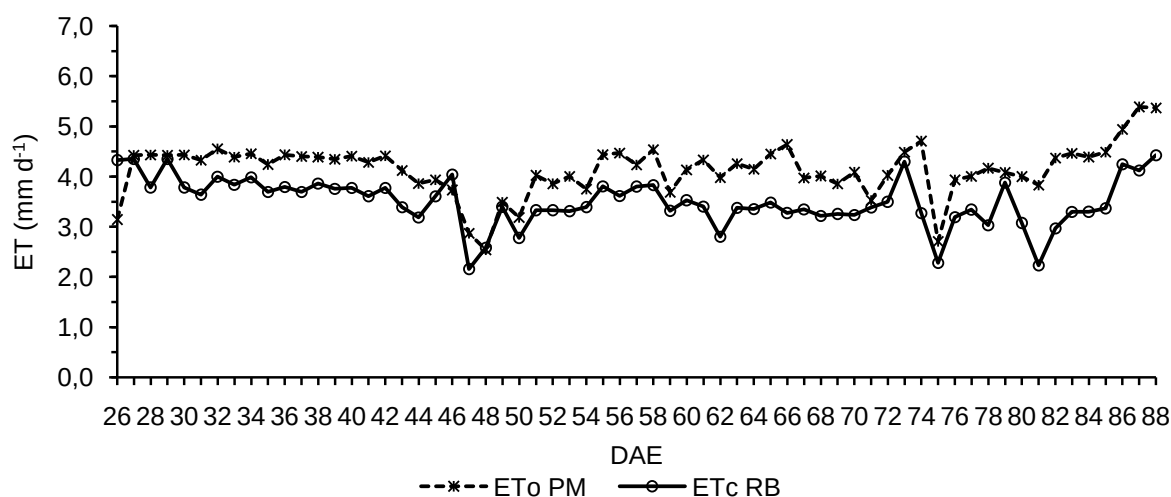


Figura 14. Evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith e evapotranspiração de cultura estimada pela técnica da razão de Bowen.

Tal comportamento evidencia que o modelo RB, como foi aplicado neste experimento, não foi sensível à variação no crescimento da cultura em área foliar e em altura, como se a cultura fosse, desde a semeadura, uma cultura em condições de referência, ou seja, com área foliar e altura constantes, de tal forma que as variações na evapotranspiração se deram praticamente só em função das variações climáticas.

A maior semelhança de comportamento de ET_c RB com ET_0 PM do que com ET_c PM foi confirmada por meio de análises de correlação linear entre ET_0 PM e ET_c RB e entre ET_c PM e ET_c RB. Essas análises resultaram em coeficiente de correlação (r) igual a 0,63 para ET_c RB x ET_0 PM e apenas 0,06 para ET_c RB x ET_c PM.

Esse comportamento de ET_c RB encontrado nesta pesquisa não foi o verificado por BEZERRA et al. (2012), com a cultura do algodão, na Chapada do Apodi, Estado do Ceará, durante dois anos consecutivos. Estes autores encontraram comportamento condizente das curvas de ET_c obtidas nos dois anos, com o desenvolvimento das curvas de crescimento da cultura em área foliar e altura, como era de se esperar.

Não foi possível identificar, até o momento, as causas da quase total insensibilidade do método da razão de Bowen nesta pesquisa, às variações nos parâmetros de crescimento e de desenvolvimento da cultura, sugerindo-se que uma análise mais meticulosa dos sensores utilizados e da localização destes em relação ao dossel da cultura precisa ser feita, conforme indicam ALLEN et al. (2011).

A aplicação da razão ET_c RB/ ET_0 PM (K_c (RB) - Figura 15) a partir dos 26 DAE, evidencia que, excetuando-se aos 26; 46 e 48 DAE, os valores de K_c obtidos dessa razão foram sempre inferiores a 1,0. Isso corrobora o que já foi discutido em relação à similaridade do comportamento entre as curvas de ET_c RB e ET_0 PM. A curva de K_c resultante dessa razão não seguiu a lógica das curvas de K_c para as culturas anuais como o feijoeiro, conhecidas na literatura. Para essas culturas, no período inicial, com área foliar pequena, os valores de K_c são menores do que 1,0, e depois vão aumentando à medida que a área foliar e a altura da planta vão crescendo, seguindo a dinâmica do desenvolvimento da planta. Como a área transpirante cresce e a altura da cultura aumenta, gradativamente os valores de ET_c vão tornando-se iguais ou superiores aos de ET_0 , o que resulta, via de regra para culturas de ciclo anual, em

valores de K_c iguais ou superiores a 1,0. Na fase de maturação das vagens, quando as folhas já entram em senescência, diminuindo o metabolismo com consequente diminuição natural da área foliar ainda ativa, transpirante, e, portanto, diminuindo a ET_c , ocorre, então, redução dos valores de K_c . No entanto, isso praticamente não ocorreu para o método RB, mesmo depois dos 67 DAE, quando foi constatado o início da maturação das primeiras vagens, e as folhas já se mostravam em início de senescência.

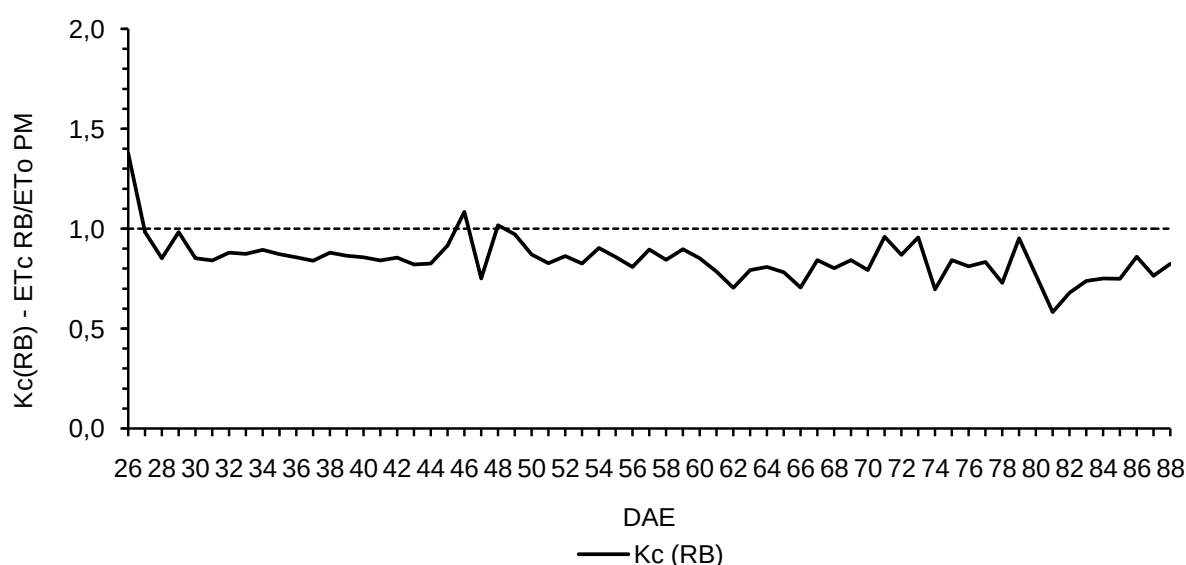


Figura 15. Curva do coeficiente de cultura $\{K_c(RB)\}$ obtido pela razão entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) obtida com o método da razão de Bowen (RB) e a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada com o método de Penman-Monteith (PM).

A lâmina total de água estimada com o método $ET_0 PM$, a partir dos 27 DAE e até os 88 DAE, foi de 235,4 mm contra 170,5 mm estimados com o $ET_0 PM^*$, isto é 64,9 mm ou 38,1% a mais. Como este valor estimado está dentro do intervalo de hLC produzido pelos métodos no item 4.1., foi possível estimar qual poderia ser a lâmina recebida pela cultura (hLR), por meio de regressão linear entre os valores totais de hLR e hLC produzidos a partir dos 27 DAE. Verifica-se que a equação linear de regressão produzida apresentou coeficiente de determinação muito próximo de 1,0 (Figura 16), o que possibilitou uma boa estimativa da hLR, que poderia ter resultado da aplicação da hLC de 235,4 mm.

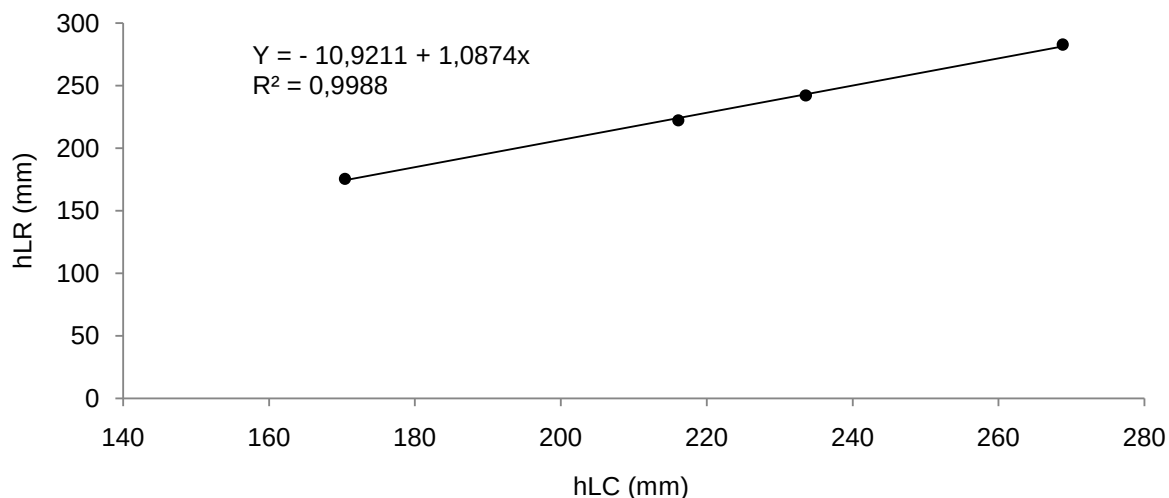


Figura 16. Regressão linear entre os valores totais de lâminas líquidas calculadas (hLC) e os de lâminas recebidas pela cultura (hLR) a partir dos 27 dias após a emergência.

Com o valor de hLC PM (235,4 mm) aplicado na equação de regressão apresentada na Figura 16, obteve-se a hLR estimada de 245,01 mm que, somados aos 122,1 mm recebidos por todas as plantas antes da diferenciação dos tratamentos (da semeadura aos 26 DAE), obteve-se hLR estimada para todo o ciclo da cultura de 367,1 mm para o tratamento PM, valor esse 69,4 mm ou 23,3 % a mais do que o valor efetivamente recebido com o cálculo errado de hLC (ETcPM*). Para que fosse possível estimar qual seria a produtividade de grãos com esse valor de hLR, foi feita análise de regressão das produtividades de grãos obtidas com as hLR obtidas no cenário do experimento. Os resultados dessa análise evidenciaram o efeito altamente significativo ($P < 0,01$) da lâmina recebida (hLR) e a produtividade de grãos, e que essa correlação pode ser representada significativamente ($P < 0,05$) por um modelo linear (Tabela 10). A equação de regressão resultante (Figura 17) permite a estimativa do ganho de produtividade de grãos à taxa de $10,34 \text{ kg ha}^{-1}$ por mm de água adicional recebido pela cultura, dentro dos limites máximo e mínimo de valores de hLR deste experimento.

Aplicando-se, nesta equação, o valor de hLR total estimado por PM, obteve-se a produtividade de grãos estimada de $2.670,4 \text{ kg ha}^{-1}$, valor esse 47,7% superior ao realmente obtido com a hLR PM* ($1.808,5 \text{ kg ha}^{-1}$). Esse valor estimado de

produtividade certamente não diferiria significativamente das produtividades médias reais obtidas nos tratamentos TENS, TCA e RB (Tabela 9).

Tabela 10. Resumo da análise de variância da regressão para efeito das lâminas recebidas na produtividade.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	17558860,700	4389715,175	149,2965 **
Resíduo	15	441069,500	29404,633	-
Regressão Linear	1	17201339,1571	17201339,1571	584,99874 *
Regressão Quadrática	1	11260,0291	11260,029	0,3829 NS
Desvios de Regressão	2	34261,5138	173130,7569	5,8879 *
Coeficiente de variação (%)			8,19	

** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; GL – graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio; F – valor de F

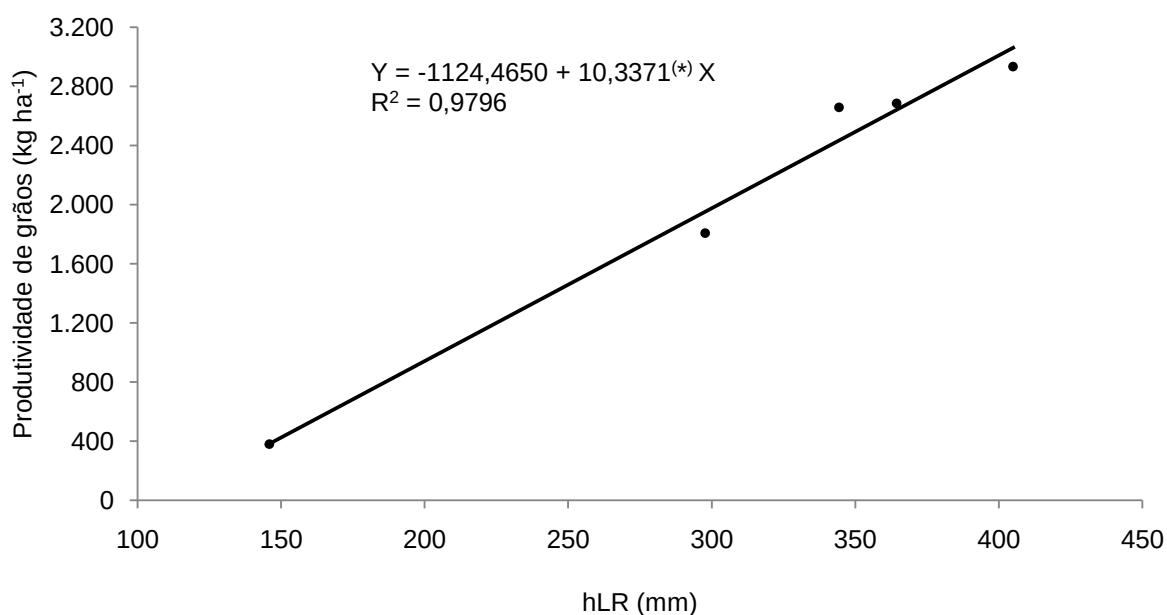


Figura 17. Produtividade de grãos em função da lâmina de água recebida. (*) – Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Analisando-se a Tabela 11 e a Figura 18, verifica-se que a eficiência de água aplicada (EAA) também aumentou linearmente com o aumento da hLR ($P < 0,01$). O modelo linear foi preferido ao modelo quadrático porque, pelo modelo quadrático, o ponto de eficiência máxima ocorre para uma hLR fora dos limites de lâminas usados

para gerar o modelo obtido, ou seja, fora do domínio da equação. Para a hLR estimada por PM de 367,1 mm, o resultado gerado pela equação de regressão linear (Figura 10) foi de 0,7328 kg de grãos por m³ de água contra 0,6075 kg m⁻³ obtido com hLR PM* (Tabela 9).

Tabela 11. Resumo da análise de variância da regressão para efeito das lâminas recebidas na EAA.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,704180	0,176045	67,02**
Resíduo	15	0,039400	0,002627	-
Regressão Linear	1	0,643051	0,643051	244,82**
Regressão Quadrática	1	0,036268	0,036268	13,81**
Desvios de Regressão	2	0,0024860387	0,012430193	4,73 **
Coeficiente de variação (%)			8,25	

** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; GL – graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio; F – valor de F

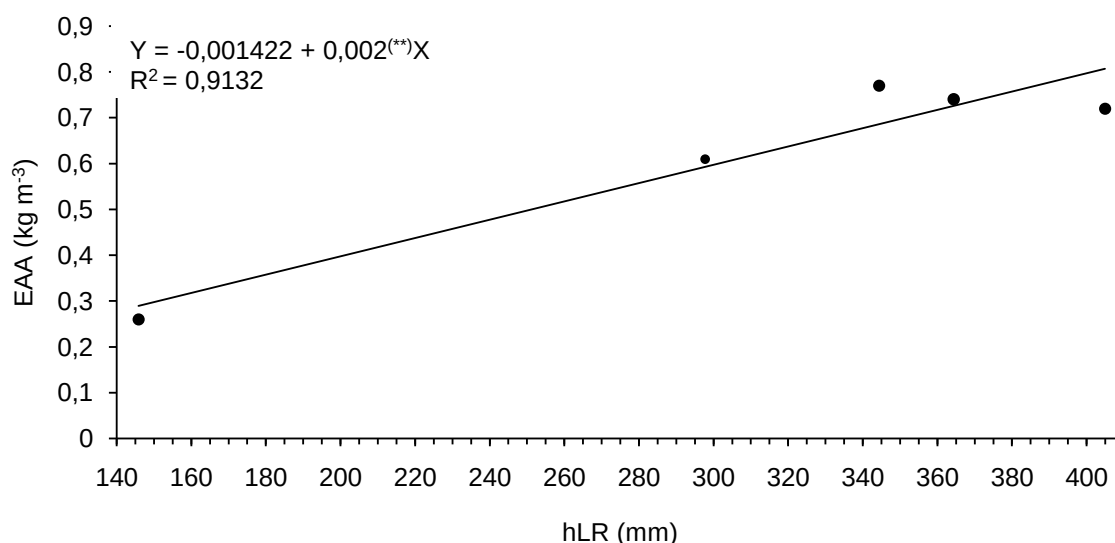


Figura 18. Eficiência da água aplicada em função da lâmina de água recebida pela cultura (hLR). (*) – Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Quanto ao número de vagens por planta, a equação linear significativa ($P < 0,01$), resultante da análise de regressão, evidencia que esta variável foi crescente à taxa linear constante com o aumento da hLR (Tabela 12 e Figura 19). A estimativa desta

variável para a hLR de PM é de 10,80 contra 7,75 vagens por planta (Tabela 8) obtida com o hLR PM*.

Tabela 12. Resumo da análise de variância da regressão para os dados do número de vagens por planta.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	116,4870	29,1217	167,8487 **
Resíduo	15	2,6025	0,1735	-
Regressão Linear	1	102,7329	102,7329	592,1204 **
Regressão Quadrática	1	0,1568	0,1568	0,9038 NS
Desvios de Regressão	2	13,5973	6,7987	39,1853
Coeficiente de variação (%)			4,43	

** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; GL – graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio; F – valor de F

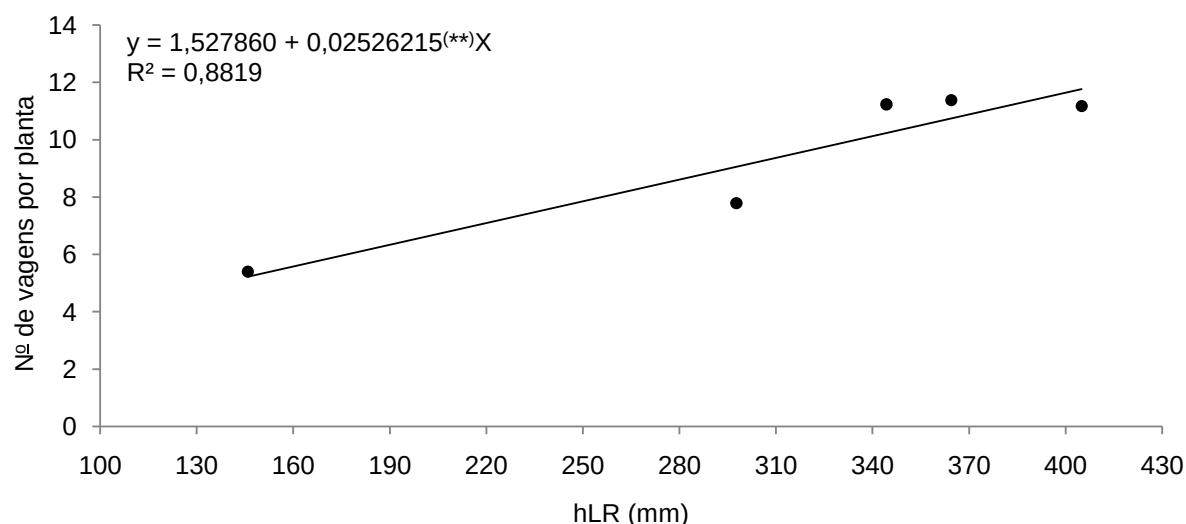


Figura 19. Número de vagens por planta em função da lâmina de água recebida. (*) – Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Assim como o número de vagens por planta, o número de grãos por vagem também aumentou linearmente ($P < 0,01$) com o aumento da lâmina recebida (Tabela 13 e Figura 20). A estimativa dessa variável em função da hLR PM, por meio da equação de regressão, resultou em 4,46 grãos por vagem. O valor real obtido para a hLR PM* foi de 4,25 grãos por vagem (Tabela 9), resultado esse diferente do obtido por ARF et al. (2004), que não encontraram diferença significativa do número de grãos por vagem

quando a lâmina de água recebida pela cultura variou de 215 a 287 mm, em 2001, e de 150 a 254, em 2002, para a cultura do feijoeiro cultivar IAC Carioca Eté. Esses valores de lâmina aplicada por esses autores são, na média, inferiores aos recebidos pela cultura neste experimento, excetuando-se para o tratamento Test.

Tabela 13. Resumo da análise de variância da regressão para os dados de grãos por vagem.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	4,2830	1,0707	16,3473 **
Resíduo	15	0,9825	0,0655	-
Regressão Linear	1	4,0270	4,0270	61,4808 **
Regressão Quadrática	1	0,0036	0,0036	0,0554 NS
Desvios de Regressão	2	0,2524	0,1262	1,9266
Coeficiente de variação (%)			6,11	

** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; GL – graus de liberdade; SQ – soma de quadrados; QM – quadrado médio; F – valor de F

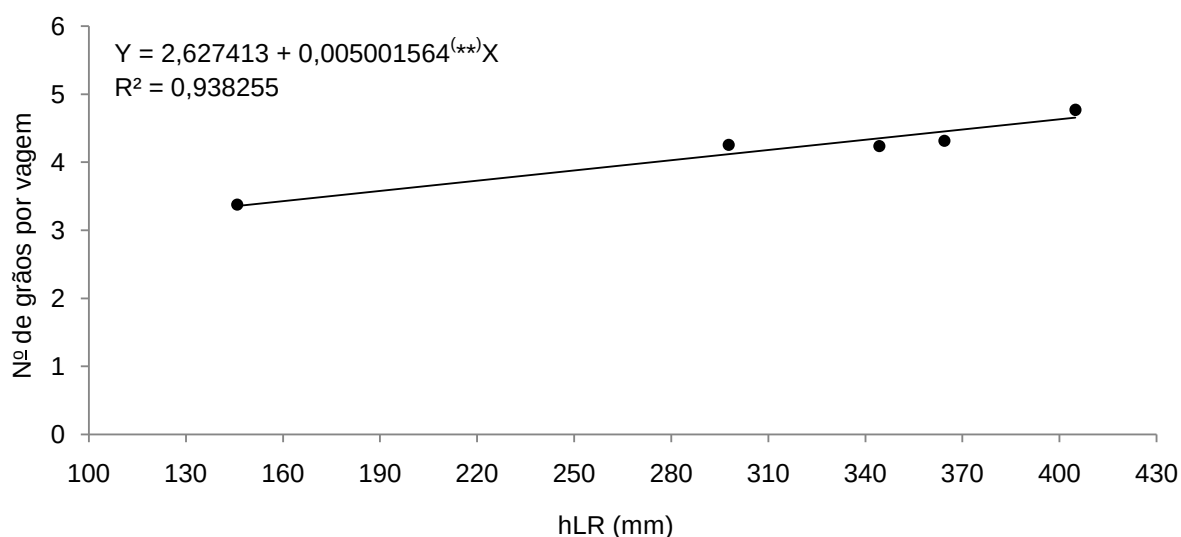


Figura 20. Número de grãos por vagem em função da lâmina de água recebida. (*) – Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Observando-se as Tabelas 14 e 15, verifica-se que o número de irrigações com o manejo de irrigação PM, após a diferenciação dos tratamentos, deveria ter sido de 16 irrigações, totalizando a lâmina líquida calculada (hLC) de 235,4 mm até o final do experimento e não 12 irrigações e hLC de 170,4 mm como foi com o manejo real feito

com PM*. Três das quatro irrigações a mais teriam sido aplicadas durante a fase mais crítica de déficit hídrico, de 2 para 3 irrigações na fase F – IV e de 5 para 7 na fase EV – M, o que beneficiaria os fatores de produção e a eficiência de uso da água aplicada, conforme já foi verificado nas estimativas para esse cenário. A quarta irrigação a mais seria aplicada na fase final de maturação das vagens (M - F), em função da extensão provável do ciclo que ocorreria, como aconteceu nos demais tratamentos de manejo de irrigação, mas que provavelmente não contribuiria significativamente para o aumento dos fatores de produção e da eficiência da água aplicada, uma vez que, no final dessa fase, o número de vagens, o número de grãos e a massa desses grãos já estão estabelecidos, e a maturação fisiológica das vagens, totalmente completada.

Tabela 14. Número de irrigações (NI) antes (até os 26 DAE) e após o início da diferenciação dos tratamentos e lâminas calculadas (hLC), médias e totais, em cada período, considerando o novo cenário (método de Penman-Monteith corrigido –ETc PM).

Períodos	DAE	Tratamentos	hLC (mm)	hLC (mm d ⁻¹)	NI	hLC média (mm)
I	Até os 26 (26)	TENS	-	-	8	-
		TCA	-	-		-
		RB.	-	-		-
		PM* PM	-	-		-
		Test.	-	-		-
Veg - BF	27 – 45 (19)	TENS	63,5	3,3	3	21,2
		TCA	63,7	3,4	4	15,9
		RB	72,0	3,8	5	14,4
		PM* PM	62,4 67,6	3,3 3,6	4 4	15,6 16,9
		Test.	-	-	-	-
F – IV	46 – 55 (10)	TENS	47,1	4,7	3	15,7
		TCA	43,5	4,4	3	14,5
		RB	24,9	2,5	2	12,5
		PM* PM	28,6 40,9	2,9 4,1	2 3	14,3 13,6
		Test.	-	-	-	-
EV – M	56 – 77 (22)	TENS	113,9	5,2	8	14,2
		TCA	98,8	4,5	8	12,4
		RB	81,3	3,7	6	13,6
		PM* PM	67,2 100,1	3,1 4,6	5 7	13,4 14,3
		Test.	-	-	-	-
M - Final	78 – 86	TENS	45,5	4,1	3	15,2
	78 – 83	TCA	27,8	2,5	2	13,9
	78 – 88	RB	37,9	3,4	3	12,6
	78 - 80* 86 ^(a)	PM* PM	12,3 26,8	4,1 3,0	1 2	12,3 13,4
		Test.	-	-	-	-

^(a)Última irrigação programada para o PM.

Tabela 15. Número total de irrigações (NTI), lâminas líquidas calculadas (hLC), totais e médias por tratamento, e intervalo médio entre irrigações (IMI), durante o período de diferenciação dos tratamentos (27 aos 88 DAE), considerando o novo cenário (método de Penman-Monteith corrigido – PM).

Tratamentos	^(a) NTI	hLC (mm)			IMI (dias)
		Total (mm)	Média por irrigação (mm)	Média do período (mm d ⁻¹)	
TENS	17	270,0	15,9	4,4	3,6
TCA	17	233,8	13,8	3,8	3,6
RB	16	216,1	13,5	3,5	3,9
PM* PM	12 16	170,5 235,4	14,2 14,7	3,2 3,9	4,5 3,6
Test.	1	-	-	-	-

Os valores dos fatores de produção e de EAA estimados para PM, nesse cenário, provavelmente não difeririam significativamente dos obtidos para as mesmas variáveis nos tratamentos TCA, RB e TENS (Tabela 8) do cenário do experimento.

5 CONCLUSÕES

Considerando as condições climáticas particulares do período experimental, caracterizadas principalmente pela ausência de chuvas durante todo o ciclo, para o cultivo de inverno do feijoeiro irrigado por aspersão, as principais conclusões extraídas da análise dos resultados da aplicação dos métodos de manejo de irrigação avaliados são:

- Os métodos de manejo de irrigação, com base na reposição de água à cultura do feijoeiro por meio unicamente do uso de variáveis climatológicas como são os métodos do Tanque Classe A, Razão de Bowen e Penman-Monteith, produziram lâminas totais de irrigação variando, no período de diferenciação dos tratamentos (após os 26 dias após a emergência), de 216,0 mm a 235,0 mm, lâminas essas subestimadas em relação à lâmina de 270,0 mm obtida com o método por tensiometria, que permite o monitoramento da variação do conteúdo diário de água no solo na zona radicular.

- Não houve diferença na produtividade de grãos e na eficiência de água aplicada entre esses métodos.

- As variáveis de produção, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos, na cultura do feijoeiro, responderam de forma linearmente crescente ao aumento das lâminas totais de irrigação aplicadas no intervalo de lâminas totais de irrigação aplicadas neste experimento (146,0 mm a 405,0 mm).

- Na ausência de chuva em todo o ciclo da cultura, a máxima eficiência de uso da água aplicada em feijoeiro foi alcançada com a lâmina total de irrigação de 344,3 mm recebida pela cultura no tratamento da razão de Bowen.

- O método da Razão de Bowen deve ser mais bem estudado quanto às suas limitações metodológicas para a determinação direta em campo da evapotranspiração real da cultura.

- O método da tensiometria, em condições de parcelas experimentais e na ausência da ocorrência de chuvas, foi mais efetivo na quantificação da água realmente extraída do solo pela cultura, na zona radicular.

- A definição final do método de manejo de irrigação para a cultura do feijoeiro em cultivo de inverno, na região de Jaboticabal – SP, entre os métodos avaliados nesta pesquisa, exige a repetição desse experimento em diferentes anos, na mesma época, para que as variações climáticas que ocorrem entre os anos, como a ocorrência de chuvas ao longo do ciclo da cultura, possam ser incorporadas aos resultados de produtividade de grãos e de eficiência de uso da água incorporada ao solo na zona radicular da cultura.

VI REFERÊNCIAS

- ABREU, F. B.; RODRIGUES, R.; LEAL, N. R.; JÚNIOR, A. T. A.; SILVA, D. J. H. Caracterização preliminar de acessos de feijão-de-vagem e feijão-de-corda do banco de germoplasma da UENF. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 741-742. Suplemento, julho 2000 (Resumo).
- ACOSTA, J. F. **Consumo hídrico da cultura do girassol irrigada na região da chapada do apodi - RN**. 2009. 73f (Dissertação Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- ALDRIGHI, C. B.; DUARTE, G. B.; FERNANDES, H. E.; MARTINS, S. R. Produção de feijão-vagem em ambiente protegido e a campo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 230-231. Suplemento, julho 2000 (Resumo).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH M. **Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2006.
- ALLEN, R. G. PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. **Evapotranspiration information reporting. I. Factors governing measurement accuracy**. *Agricultural Water Management*. 98, p. 899–920. 2011.
- ARAÚJO, R.; MIGLIORANZA, E.; SOUZA, J. R. P. de; ENDO, R. M.; QUINTANA, J. M.; NIENHUIS, J. Concentração de cálcio em frutos de diferentes cultivares de feijão-vagem. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 672-673. Suplemento, julho 2000 (Resumo).
- ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; SÁ, M. E.; BUZETTI, S.; NASCIMENTO, V. Manejo do solo, água e nitrogênio no cultivo de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 131-138, 2004.

ARF, O.; SÁ, M. E.; OKITA, C. S.; TIBA, M. A.; GUERREIRO NETO, G.; OGASSAWARA, F. Y. Efeito de diferentes espaçamentos e densidades de semeadura sobre o desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.8, p.533-597, 1996.

ATHANÁZIO, J. C. Adubação de feijão-vagem. In: FERREIRA, M. E.; CASTELLANE, P. D.; CRUZ, M. C. P. da. (Ed). **Nutrição e adubação de hortaliças**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.487p. 1993.

BAUSCH, W.C. Sensor height effects on calculated reference evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.3, p.791-798, 1990.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C.; SOFIATTI, V.; SANTOS, C. A. C. dos. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. **Agricultural Water Management** v. 107 p. 86-93 2012.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface, **Physical Review**, Ithaca, v.27, p.779-787, 1926.

CAMARGO, A. P.; GROHMANN, F.; CAMARGO, M. B. B. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 12, p. 1.963-1.977, 1982.

CAMPBELL, G. S.; MULLA, D. J. Measurement of soil water content and potencial. In: STEWART, B. A. & NIELSEN, D. R. **Irrigation of agricultural crop**. Madison, ASA, 1990. P. 127-141. (Agronomy monograph, 30)

CARVALHO, A. C. P. P. **Avaliação de cultivares rasteiras e híbridos F1 de feijão-de-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em cruzamentos dialélicos**. (Dissertação Mestrado) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1992.

CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_279.html. Acesso em 03 de maio de 2012.

CHABOUSSOU, F. **Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos**. (A Teoria da Trofobiose). L & PM editores, Porto Alegre, 253p. 1987.

COELHO, R. G.; LEAL, N. R.; LIBERAL, M. T.; CASTRO, L. C. A.; ROBBS, P. Produtividade de alguns cultivares de feijão-de-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) de porte baixo. **Revista Ceres**, v. 21, n. 118, p. 518-521, 1974.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2009/2010 – Décimo Segundo Levantamento – Setembro/2010. Brasília: Conab, 2010.

CUNHA, A.R. **Parâmetros agrometeorológicos de cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em ambientes protegido e de campo**. 2001. 128f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.

DANTAS NETO, F. S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró - RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 46-55, 1999.

DE OCA, G.M. Mejoramiento genético de la habichuela en el CIAT y resultados de viveros internacionales. In: DAVIS, J.; JASSEM, W. (Ed.) **El Mejoramiento genético de la habichuela in America Latina**: memorias de un taller. Cali, Colombia, CIAT, 1987. p. 60-72 (Documentos de trabajo, 30).

DICKSON, M. H.; PETZOLDT, R. Inheritance of low temperature tolerance in beans at several growth stages. **Hortscience**, Virginia, v. 22, n. 3, p. 481-483, Jun. 1987.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 123p. (Tradução de H. R. Gueyi; A. A. de Souza; F. A. V. Damasceno & J. F. de Medeiros).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome, FAO, 1979. 193p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO, 1976. 193p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. FAO Estudio de Irrigation and Drainage No. 24, Organization of the United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, 1977, 144p.

DOURADO NETO, D. et al. **Programa SWRC** (Version 1.00): Soil-Water Retention Curve (software). Piracicaba: ESALQ; DAVIS: University of Califórnia, 1995.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de Feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 385p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solo (Rio de Janeiro-RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999, 412p.

ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA. Normais Climatológicas FCAV/UNESP. Disponível em: www.fcav.unesp.br/portal_agromet/mostra_arq_multi.php?arquivo=1. Acesso em: 22 agosto 2011.

FERNANDES, E. J. **Determinação da Evapotranspiração Real pelos Métodos da Razão de Bowen e Aerodinâmico simplificado**. Tese de Livre-Docência, 108 p. Jaboticabal, 2001.

FERNANDES, E. J. **Comparação entre Três Métodos para Estimar Lâminas de Irrigação**, Irriga, Botucatu, v.13, n.1, p.36-46, janeiro-março, 2008.

FERNANDES, E. J. **Determinação do índice de estresse hídrico em cultura do feijoeiro com termômetro de infravermelho.** Irriga, Botucatu, v. 15, n.3, p. 248-257, 2010.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. **Evapotranspiração de Referência para Manejo da Irrigação em Cultura de Soja,** Irriga, Botucatu, v.8, n.2, p.132-141, maio-agosto, 2003.

FILGUEIRA, F. A R. **Novo Manual de Olericultura:** agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2008. 421 p.

FONTANA, C. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Brasília, v.26, n. 3, p.403-410, mar. 1991.

FRIZZONE, J. A. **Uniformidade e eficiência da irrigação.** Piracicaba: ESALQ, 1998. 40 p. (Série Didática).

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. **Irrigação:** Série Engenharia Agrícola volume 2. Editado por Jarbas Honório de Miranda e Regina de Matos Pires, Piracicaba: FUNEP, 2003, 703 p.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BATISTA, G. C. de; BERT FILHO, E.; PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIN, J. D. **Manual de Entomologia Agrícola.** Agronômica "Ceres" LTDA., São Paulo, 649p. 1988.

GUEDES R. E. **Manejo orgânico de cultivares arbustivas de feijão-de-vagem no Estado do Rio de Janeiro.** 2003. 98f. (Dissertação de Mestrado Fitotecnia/Agroecologia) UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO Seropédica-RJ, 2003.

HEILMAN, J.L.; BRITTIN, C.L. **Fetch requirements for bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes***. Agricultural and Forest Meteorology, 44 (1989) 261-273 Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam - Printed in The Netherlands

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: Proc. ASCE Intl. Symp. Lysimetry: Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, 1-9. R. G. Allen, T. A. Howell, W. O. Pruitt, I. A. Walter, and M. E. Jensen, eds. New York, N. Y.: ASCE. 1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA–IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Seção 3: Aspectos da atividade agropecuária e extensão vegetal, 1996. p.3-83.

ITIER, B.; CELLIER, P.; RIOU, C. Actual evapotranspiration measurement by a simplified aerodynamic system. Advances in evapotranspiration, Chicago, **ASAE Publication**, p. 201-215, 1985.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transactions of the ASAE**, v.14, p.954-959, 1971.

KIGEL, J. Branching, flowering and pod-set patterns in snap-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by temperature. **Canadian Journal of Plant Science** v.71, n.4, p.1.233-1.242, 1990.

LEAL, N. R. Introdução e adaptação da cultivar de feijão-vagem de porte determinado “Cascade”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 23, Rio de Janeiro, 1983. **Anais...** Rio de Janeiro, SOB, 1983. p.145.

LEAL, N. R. Cota – nova cultivar de feijão-vagem. **Horticultura Brasileira**. v.5, n.1, p. 62, 1987.

LEAL, N. R. Andra – nova cultivar de feijão-vagem. **Horticultura Brasileira** v.8, n.1, p. 30, 1990.

LEAL, N. R.; ARAÚJO, M. L. de; LIBERAL, M.T.; CRUZ JÚNIOR, F.G. da. Comportamento do feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em cultura estaqueada e rasteira. Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro. 1986.4p. (**PESAGRO-RIO. Comunicado Técnico, 153**).

LOPES, A. S.; PAVANI, L. C.; CORÁ, J. E.; ZANINI, J. R.; MIRANDA, H. A. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 89-100, 2004.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed., atual e ampliada. Viçosa-MG: UFV, 2009. 358p.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; ANDRE, R. G. B.; BERNARDO, S. Coeficientes do tanque Classe “A” para a estimativa da evapotranspiração de referência, em Campos dos Goytacazes-RJ. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.14, p.123-128, 2006.

MONTEIRO, P. F. C.; ÂNGULO FILHO, R. MONTEIRO, R. O. C. Efeito da irrigação e da adubação nitrogenada sobre as variáveis agrônômicas da cultura do feijão. **Revista irriga**, Botucatu, SP, n. 4, v. 15, p. 386-400, 2010.

MONTEIRO, R. O. C.; COSTA, R. N. T.; LEÃO, M. C. S.; AGUIAR, J. V. de. Eficiência do uso da água e nitrogênio na produção de melão. **Revista Irriga**, Botucatu-SP, n. 3, v. 13, p. 367-377, 2008.

NUÑEZ BARRIOS, A.; FOSTER, E. Efecto del déficit hídrico sobre el crecimiento el hojas, tallos y vainas del frijol. **Agricultura Técnica en México**, n. 1, v. 22, p. 99-109, 1996.

OLIVEIRA, A. P.; ANDRADE, A. C.; TAVARES SOBRINHO, J.; PEIXOTO, N. Avaliação de linhagens e cultivares de feijão-vagem de crescimento indeterminado, no município de Areia - PB. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.19, n.2, p.159–162, 2001.

OMORI, S.; SUGIMOTO, M. Studies on the use of large quantities of cattle and chicken manure for horticultural crops. IV- The effects of fresh manure applied year after year on growing vegetables and the maximum amount tolerated. **Bulletin of the Kanagawa Horticultural Experiment Station** , Kanagawa, v. 25, p.59-68, 1978.

PAULA JÚNIOR, T. J. de et al. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro comum na região central brasileira**. Viçosa: EPAMIG, 2008. 180.p (Série documentos, n. 42).

PAVANI, L. C.; LOPES, A. S.; GALBEIRO, R. B. Manejo da irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.12-21, 2008.

PAZ, V. P .S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FOLEGATTI, M. V. Redução na receita líquida por déficit ou excesso de água na cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.9, p.869-875, 1997.

PEIXOTO, N.; THUNG, M. D. T.; SILVA, L. O.; FARIAS, J. G.; OLIVEIRA, E. B.; BARBEDO, A. S. C.; SANTOS, G. Avaliação de cultivares arbustivas de feijão-vagem em Anápolis. **Horticultura Brasileira**, Brasília,v.11, n.2,p151–152, 1993.

PEIXOTO, N.; THUNG, M. D. T.; SILVA, L. O.; FARIAS, J. G.; OLIVEIRA, E. B.; BARBEDO, A. S. C.; SANTOS, G. Avaliação de cultivares arbustivas de feijão-de-vagem, em diferentes ambientes do estado de Goiás, Goiânia –GO. **EMATER-GO Assessoria de Comunicação Social**, 1997 (Boletim Técnico 01).

PENMAN, H. L. Evaporation: Introduction survey. Netherlands **Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, n.1, p.9-29, 1956.

PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: ESALQ. 1997.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 2002. 478p.

PEREZ, P. J.; CASTELVI, F.; IBAÑES, M.; ROSSEL, J. I. **Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes**. Agricultural and Forest Meteorology, v.97, p.141-150, 1999.

Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, EMBRAPA Rio de Janeiro, 1999. 412p.

PESSOA, P. C. S.; MENDONÇA, F. C.; SILVA, F. C. Redução do custo operacional de irrigação e uniformização de aplicação de água em pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30.; 2001, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz de Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

PINTO, C. M. F.; VIEIRA, R. F. ; VIEIRA, C.; CALDAS, M. T. Idade de colheita do feijão-vagem anão cultivar Novirex. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 2, p. 163-167, julho. 2001.

PIRES, R. C. M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FOLEGATTI, M. V. Necessidades hídricas das culturas e manejo de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação: Série Engenharia Agrícola**. v. 1, 410 p. Piracicaba: SBEA, 2001.

PORTES, T. A. Ecofisiologia. In: ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam a produtividade. Associação Brasileira de Pesquisa da Patassa e do Fosfato. Piracicaba- SP. 1988.

RAPASSI, R. M. A.; SÁ, M. E.; TARSITANO, M. A. A.; CARVALHO, M. A. C.; PROENÇA, É. R.; NEVES, C. M. T. C.; COLOMBO, E. C. M. Análise econômica comparativa após um ano de cultivo do feijoeiro irrigado, no inverno, em sistemas de plantio convencional e direto, com diferentes fontes e doses de nitrogênio. **Bragantia**, v. 62, n. 3, p. 397-404, 2003.

REIJNJES, C.; HAVERKORT, B; MATERS-BAYER, A. **Agricultura para o futuro**: uma introdução à agricultura sustentável e de baixo uso de insumos externos. Tradução de COMERFORD, J. C. 2 ed. Rio de Janeiro: AS-PTA. 324p. 1999.

RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 151f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SANTOS, G. M.; OLIVEIRA, A. P.; COSTA, C. C.; SILVA, J. A. L.; ALVES, E. U.; QUEIROZ FILHO, J. L. Teor de matéria seca e fibra em vagens de feijão-de-vagem, cultivado com adubo orgânico. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 770-771. Suplemento, julho 2000 (Resumo).

SANTOS, R. H. S. **Crescimento, produção e qualidade da alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada com composto orgânico**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 144 p.

SALVADOR C. A. **Análise da conjuntura agropecuária safra 2011/12**. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento-Departamento de Economia Rural-PR, 2011

SARTORATO, A.; SEIJAS, C. A. R.; YOKOYAMA, M. Principais doenças e pragas do feijoeiro comum no Brasil. Embrapa – CNPAF, Goiânia – GO. 48p. 1983.

SILVA, C. C.; DEL PELOSO, M. J. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro comum na Região Central-brasileira 2005-2007**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 139p. Documentos, 193.

SILVA, E. C.; SILVA FILHO, A. V.; ALVARENGA, M. A. R. Efeito residual da adubação efetuada no cultivo da batata sobre a produção do feijão-de-vagem. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 312-315, novembro 2003.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V. Determinação da evapotranspiração do capim Tanzânia, utilizando um sistema automático de razão de Bowen e um lisímetro de pesagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 2001, Fortaleza. **Anais...** v.2, p.923.

SILVA, T. J. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do balanço de radiação e lisimetria de pesagem hidráulica**. 2005. 99f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

TAVARES SOBRINHO, J.; OLIVEIRA, A. P.; SOUZA, A. P.; ARAÚJO, J. S.; NORONHA, M. A. S. Precocidade e produtividade do feijão-vagem em função de doses e formas de aplicação de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 793-794. Suplemento, julho 2000 (Resumo).

TOMAZ, J. P.; AGUIAR, M. S.; TANIGUCHI, C. A. K.; BATISTA JÚNIOR, C. B.; BRANDÃO, R. A. P.; ATHANÁZIO, J. C. Correlação entre envelhecimento acelerado de sementes de feijão-vagem e sua germinação no campo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, Suplemento CD-ROM, julho 2001.

TURCO, J. E. P.; FERNADES, E. J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001, 1 CD-ROM.

VIANA, T. V. A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido**. 2000. 137f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

VIEIRA, H. J.; LIBARDI, P. L.; BERGAMASCHI, H.; ANGELOCCI, L. R. Comportamento de duas variedades de feijoeiro sob regimes de disponibilidade hídrica do solo

(Extração de água do solo e evapotranspiração). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.2, p.165-176, 1989.

VIEIRA-JÚNIOR, P. A.; DOURADO-NETO, D.; SMIDERLI, O. J.; CICERO, S. M. Efeitos de métodos de irrigação sobre a produção e a qualidade de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 20, n. 1, p.100-105. 1998.

ANEXOS

ANEXO 1. Coeficiente de tanque (Kt) para tanque classe A, para área coberta com grama e níveis de umidade relativa média e velocidade média do vento.

Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Tanque colocado em área cultivada com vegetação baixa			
	Tamanho da bordadura (grama) m	Umidade relativa média (%)		
		Baixa < 40	Média 40-70	Alta > 70
Baixa < 2	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
Morado 2-5	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
Alta 5-8	1	0,45	0,50	0,60
	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75
Muito alta >8	1	0,40	0,45	0,50
	10	0,45	0,55	0,60
	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,55	0,60	0,65

Adaptado de ALLEN et al. 2006.

ANEXO 2. Dados climáticos do período de execução do experimento.

DAE	T (°C)	T máxima (°C)	T mínima (°C)	Rn (MJm ⁻²)	U2 (ms ⁻¹)	UR (%)
27	19.2	28.9	11.1	11.5	0.8	72.7
28	18.3	28.6	11.0	11.2	0.9	64.5
29	19.2	28.9	11.1	11.5	0.8	61.1
30	18.3	28.6	11.0	11.2	0.9	56.7
31	15.8	26.7	6.8	11.2	1.0	50.9
32	16.9	27.3	7.8	11.8	0.8	55.1
33	17.4	27.8	8.5	11.5	0.9	56.7
34	16.6	27.7	7.7	11.9	0.8	57.2
35	16.3	26.7	8.0	11.5	0.7	56.0
36	16.3	28.0	6.2	11.5	0.9	56.2
37	16.7	28.5	7.9	11.2	0.7	53.0
38	16.4	28.2	7.7	11.7	0.7	48.0
39	16.4	27.9	7.3	11.6	0.8	51.8
40	17.4	28.7	8.5	11.6	0.9	57.4
41	16.9	27.4	9.0	11.5	0.9	53.0
42	16.4	27.8	6.7	11.6	0.9	48.5
43	19.0	29.4	10.1	10.7	0.8	45.3
44	19.5	29.5	10.6	10.1	0.7	49.5
45	19.8	29.5	12.4	10.7	0.9	57.9
46	19.8	30.4	11.1	9.4	1.4	58.5
47	21.2	26.8	16.6	7.2	2.4	72.4
48	18.7	25.4	16.1	7.4	1.8	82.7
49	20.6	28.9	15.4	10.1	1.5	76.6
50	20.1	26.8	15.9	8.8	2.2	74.3
51	20.2	28.5	11.9	10.9	1.8	66.6

(continua...)

ANEXO 2. Dados climáticos do período de execução do experimento.

DAE	T (°C)	T máxima (°C)	T mínima (°C)	Rn (MJm ⁻²)	U2 (ms ⁻¹)	UR (%)
52	19.4	28.0	12.1	10.8	1.1	65.2
53	19.1	28.9	11.3	10.7	1.3	59.2
54	19.3	28.9	11.3	10.6	0.6	56.3
55	20.0	30.1	11.2	11.2	1.1	51.6
56	20.6	30.8	11.8	11.1	1.2	49.9
57	21.1	31.0	12.5	11.2	0.7	50.2
58	20.1	30.1	12.0	10.8	1.4	54.7
59	17.5	26.8	9.6	10.7	1.1	50.6
60	17.6	28.5	7.8	11.0	0.8	47.7
61	19.3	29.0	10.9	10.6	1.4	48.8
62	20.3	27.9	11.2	9.4	1.5	54.5
63	22.0	30.7	15.6	10.4	1.3	46.3
64	19.4	28.9	10.0	10.4	1.2	46.9
65	18.9	30.1	9.1	11.3	1.1	45.3
66	20.7	31.9	10.2	11.2	1.2	41.5
67	21.0	30.3	13.0	10.7	1.0	57.2
68	20.3	30.1	11.4	10.5	1.4	60.7
69	19.7	29.2	12.2	10.6	1.9	62.1
70	18.9	28.3	11.0	11.0	1.7	62.9
71	16.0	25.1	9.0	11.2	1.1	64.2
72	17.0	28.6	6.6	11.3	0.9	53.0
73	18.6	31.0	8.3	11.3	1.0	48.6
74	19.9	31.6	9.2	11.6	1.1	39.1
75	20.6	30.6	11.2	10.8	1.2	49.6
76	20.6	29.1	12.3	10.5	1.4	58.3
77	20.8	30.1	12.8	9.7	1.4	47.1
78	20.6	29.6	11.6	9.3	2.2	45.4
79	20.6	29.1	12.3	10.0	1.9	46.7
80	17.9	25.9	11.0	11.5	2.1	55.5
81	14.3	23.7	6.1	11.8	2.6	51.5
82	15.1	26.1	5.1	12.1	1.3	46.0
83	15.3	27.0	5.9	12.3	1.3	43.5
84	15.7	27.8	4.4	12.4	0.9	39.4
85	16.3	28.7	5.1	12.3	0.8	37.6
86	18.2	30.7	7.1	12.6	0.9	33.7
87	19.1	32.5	6.8	13.3	1.1	30.7
88	18.8	32.6	7.0	12.6	1.2	28.1

ANEXO 3. Evapotranspiração da cultura estimada diariamente para os métodos do TCA, RB e PM e nos intervalos entre irrigações para a tensiometria.

DAE	ETc TCA (mm d-1)	ETc RB (mm d-1)	ETc TENS (mm/interv. Irrig.)	ETc PM (mm d-1)
27	2.0	4.4		2.63
28	2.9	3.8		2.55
29	2.5	4.4		2.84
30	3.1	3.8		2.74
31	3.1	3.6		2.70
32	2.4	4.0		3.26
33	3.0	3.8		3.07
34	2.9	4.0		3.30
35	2.7	3.7		3.35
36	4.3	3.8		3.34
37	2.9	3.7		3.56
38	3.1	3.9		3.64
39	4.2	3.8		3.62
40	2.8	3.8	26.2	3.72
41	4.4	3.6		3.62
42	4.0	3.8		3.73
43	3.7	3.4	23.0	3.58
44	4.2	3.2		3.68
45	4.0	3.6	13.1	3.53
46	4.0	4.0		3.01
47	3.4	2.2		2.49
48	2.6	2.6	15.4	2.44
49	3.2	3.4		3.52
50	5.1	2.8		2.74
51	3.8	3.3	15.4	3.44
52	5.1	3.3		3.57
53	5.8	3.3		3.45
54	4.4	3.4	16.3	3.92
55	6.4	3.8		3.82
56	5.9	3.6		3.74
57	4.9	3.8	14.6	4.28
58	5.4	3.8		3.52
59	4.6	3.3		3.36
60	5.6	3.5	14.7	3.84
61	4.8	3.4		3.31
62	4.1	2.8		2.95
63	5.3	3.4	12.0	3.27
64	5.9	3.4		3.20
65	5.9	3.5	12.8	3.50
66	5.4	3.3		3.50
67	4.1	3.4		3.38
68	4.8	3.2	13.7	3.29
69	5.2	3.3		2.99
70	3.1	3.2		3.03
71	4.6	3.4	15.4	2.74
72	3.6	3.5		3.10
73	4.5	4.3		3.12
74	4.7	3.3	15.5	3.09

(continua...)

ANEXO 3. Evapotranspiração da cultura estimada diariamente para os métodos do TCA, RB e PM e nos intervalos entre irrigações para a tensiometria.

75	3.7	2.3		1.97
DAE	ETc TCA (mm d-1)	ETc RB (mm d-1)	ETc TENS (mm/interv. Irrig.)	ETc PM (mm d-1)
76	3.4	3.2		2.45
77	5.8	3.3	15.2	2.06
78	5.2	3.0		1.82
79	3.9	3.9		2.00
80	3.4	3.1	16.9	1.99
81	3.3	2.2		
82	3.0	3.0		
83	3.5	3.3	15.8	
84		3.3		
85		3.4		
86		4.2	12.8	
87		4.1		
88		4.4		
Média	4.1	3.5	4.3	3.2
Total	233.6	216.1	268.6	170.4